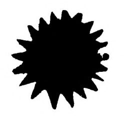

Эврика
Е. Седов
Занимательно об электронике
Занимательно об электронике
Е. Седов



Е. Седов

Занимательно об электронике

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЦК ВЛКСМ
«МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ»
1966

6П2.15
С28

Художник Б. ДИОДОРОВ

Чему посвящается эта книга? Радио? Локации? Телевидению? Лазерам? Вычислительным электронным машинам?

Но на любую из названных тем можно было бы написать отдельную книгу. Больше того — такие книги уже написаны. Среди них есть специальные и популярные, большие и малые, для начинающих и студентов, для ученых и для инженеров — на любой уровень знаний и на любой вкус. Кроме локации, телевидения, радиосвязи и вычислительной техники, приборы, созданные электроникой, обслуживают ряд других областей. Скажем, такие, как управление и измерение на расстоянии, изучение молекул, атомов и ядер, радиоастрономия, новейшие методы исследования в биологии и медицине, электронная технология обработки металлов, преобразование тепловой энергии в электрическую с помощью полупроводников.

И все это электроника, потому что все области техники нуждаются в электронных приборах, а в них действует подвижный, неутомимый и всегда готовый к услугам вечный труженик — электрон.

Так можно ли рассказать обо всем в одной книге об электронике? Да притом так, чтобы читатель не только увидел, что все это существует на свете (о чем он, наверно, и без нашей книги давно уже знает), а мог понять принципы устройства и работы различных электронных приборов, уяснить сущность методов и идей.

Придется признаться, что писать книгу об электронике с охватом всех областей техники, в которые она уже пустила глубокие корни, было отнюдь не легко.

Приходилось отбирать лишь те области применения, явления и процессы, без которых невозможно было двигаться дальше. Описания поведения электронов надо было переводить с языка уравнений, графиков и формул на общедоступный язык. Однако, несмотря на все противодействия со стороны автора и редактора, некоторые формулы и кривые

все-таки перекочевали в нашу книгу со страниц монографий и специальных трудов. Разумеется, были предприняты все меры к тому, чтобы сделать их удобоваримыми. Для этого приходилось то пускаться в длинные рассуждения, то подыскивать аналогии и примеры из жизни. Но все это служит плохим оправданием в глазах тех читателей, которые предпочли бы понять электронику без уравнений и без кривых.

Но не будет ли подобное представление слишком уж приблизительным? Ведь кривые и уравнения — это специфический язык электроники, и вряд ли было бы целесообразно обходить его стороной. Давно установлено, что нельзя изучить быт, нравы, культуру какой-нибудь нации, не зная ее языка.

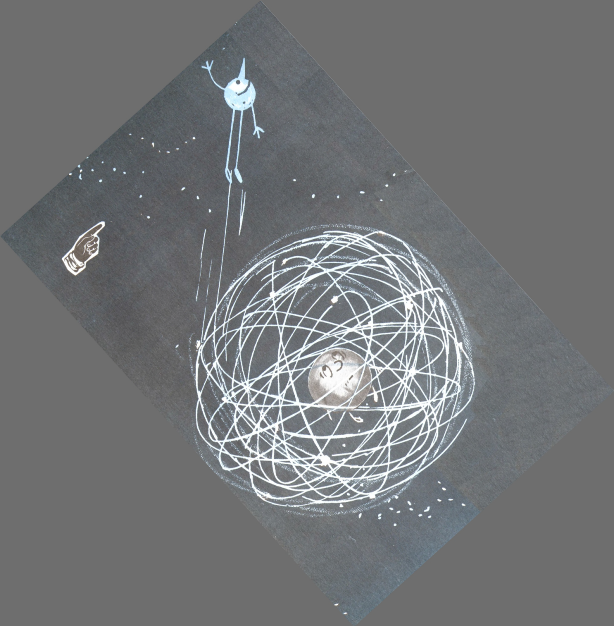
Форма книги несколько необычна. Понятия, без которых нельзя уяснить суть электроники, даны в виде рисунков и текста под общей рубрикой «Это лежит в основе». Эти разделы чередуются с небольшими новеллами, в которых рассказано, как рождались понятия, элементы, приборы, что из чего вытекало и что к чему привело. Мы полагаем, что форма эта поможет читателю, впервые входящему в мир электроники, с одной стороны, без труда усвоить основы, а с другой — приобрести цельное представление об электронике, как о самостоятельной области современной науки и техники. Эта область обладает своей внутренней логикой, стержнем, на который нанизано множество приложений, методов и идей.

Само название «электроника» уже говорит о многом: без электрона не обходится ни один электронный прибор. Вот с него-то мы и начнем.

ГЛАВА I

электроны и электроника

В этой главе
читатель знакомится
с историей открытия
электрона и заодно
узнает, почему именно
этой частице суждено
было стать главной
«деталью» некоторых
электронных приборов,
давших развитию
электроники первый
толчок.

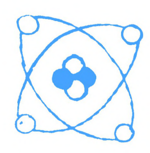


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

РАССТАВШИСЬ С АТОМОМ, ЭЛЕКТРОН ОБРЕТАЕТ СВОБОДУ

I.1

Основой огромного здания электроники, воздвигнутого современной наукой и техникой, является маленькая частица, именуемая *электроном*.



Читателю, очевидно, известно, что атомы всех веществ содержат в себе электроны, вращающиеся по определенным орбитам вокруг ядра.

I.2

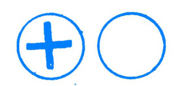
Электрон никто никогда не видел. Радиус его в 400 000 000 000 раз меньше одного миллиметра. Самый совершенный из известных нам микроскопов не позволяет видеть такие частицы.
Масса электрона в 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 раз меньше, чем масса граммовой гирьки. Ясно, что такую частицу на весах взвесить нельзя.

I.3



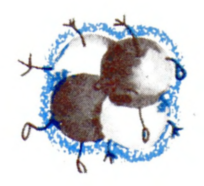
Присутствие электрона обнаруживают совсем по-другому. У электрона есть своеобразная «визитная карточка» — он несет в себе крошечную порцию электричества — отрицательный заряд, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулона.

I.4



Помимо электронов, в состав каждого атома входят *протоны* и *нейтроны.*

Эти частицы плотно склеены, сцементированы между собой сильными ядерными полями и образуют монолитное *атомное ядро.*

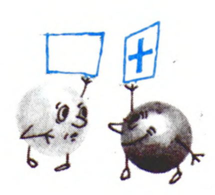


I.5



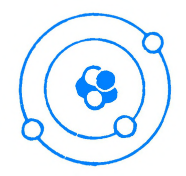
Рядом с электроном протон и нейтрон выглядят сущими гигантами: масса каждого из них больше массы одного электрона почти в 1840 раз...

I.6



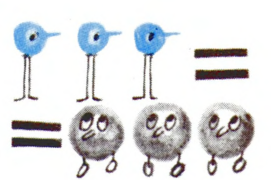
Нейтрон не несет в себе никакого заряда, электрически он нейтрален. Отсюда и имя — нейтрон. Заряд протона по величине равен заряду одного электрона ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулона), но имеет положительный знак.

I.7



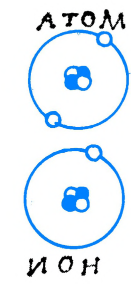
В целом *атом тоже нейтрален,* потому что число электронов в атоме равно числу протонов в его ядре.

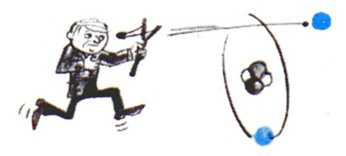
Электрон, который вращается на одной из орбит атома, — это *связанный электрон.*



1.8

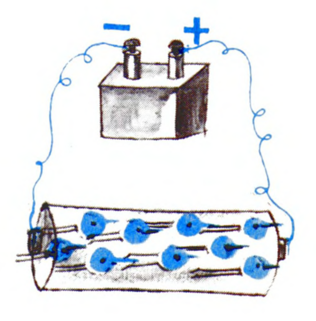
Часто под действием внешних сил электроны приобретают свободу: они расстаются со своими атомами, срываясь с их наружных орбит. Потеряв электрон, атом уже не будет нейтральным: он превращается в положительно заряженный *ион.*

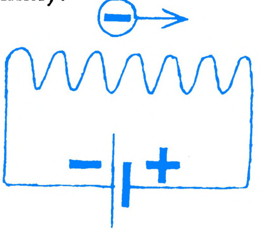




1.9

Отрицательный заряд электронов вынуждает их двигаться к металлической пластине, подключенной к положительному полюсу источника электричества (напряжения).





Почему электрон?

Как смогла частица материи с массой, в 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 раз меньшей, чем масса граммовой гирьки, приобрести в нашей жизни такой существенный вес?

Всего 100 лет назад об электроне не знал никто. Зато сейчас едва ли можно найти человека, который хотя бы краем уха не слышал о нем. Все говорят об электроне с большим уважением. Пишут книги, в которых он является



главным героем. Притом героем всегда положительным, несмотря на отрицательный знак его заряда.

А все потому, что электрон стал главной «деталью» электронных приборов, играющих во всех областях жизни, науки и техники чрезвычайно важную роль.

«Деталь» оказалась очень удобной.

Во-первых, она легка и подвижна: еще задолго до начала «космической эры» физики, исследуя движущиеся в трубке электроны, разгоняли их до космических скоростей.

Во-вторых, «деталь» эта не знает износа: никто пока не сумел разрушить, «сломать» электрон.

В-третьих, «деталь» вовсе не дефицитная: пока не иссякнет энергия источника тока, он будет посылать по «конвейеру» (по проводу) поток этих «деталей». Их будет столько, сколько запросят все «цехи» и «участки» сложного «производства», то есть все схемы и узлы, входящие в передатчик, приемник или любой другой электронный прибор.

Эта «деталь» прекрасно работает в самых различных условиях: в вакууме (электронные трубки и лампы), в газах (газоразрядные лампы) и даже в твердой среде (полупроводники).

Слов нет — электрон оказался очень удобным. Но почему все-таки именно ему принадлежит в современной технике такая видная роль? Ведь вслед за ним были открыты протоны, нейтроны, фотоны, мезоны и гипероны — многочисленное семейство так называемых элементарных частиц.

Так почему же есть электроника, но до сих пор нет протоники? Почему нет нейтроники или мезоники? Неужели потому лишь, что электрон обнаружили первым? Или дело тут связано с какими-то особыми, исключительными способностями, которых нет у других частиц?





Почему нет протоники?

Взять хотя бы такую частицу, как нейтрон. Что она собой представляет? Во-первых, эта частица не имеет заряда. Во-вторых, масса ее превышает массу электрона более чем в 1840 раз. Поскольку нейтрон не имеет заряда, то к действию, скажем, электрического внешнего поля он относится безразлично, нейтрально. А раз так, значит, с помощью поля нейтроном нельзя управлять. Электрон — дело другое. Заряженный отрицательно, он всегда стремится к пластине с положительным потенциалом (см. I.9). Изменяя потенциал, можно управлять электронами: ускорять и замедлять их движение, изменять направление, увеличивать и уменьшать их поток.

Но вот другие частицы — протоны, к действию поля также не безразличны, потому что несут в себе порцию положительного заряда. Почему же в таком случае вместо электронных приборов не используют приборы протонные?

Протон обладает массой в 1840 раз большей, чем электрон. Положите обычное пушечное ядро, а рядом — ядро, которое тяжелее его в 1840 раз. Если вес первого принять равным 30 килограммам, то второе окажется тяжелее десяти космических кораблей!

Тяжеловесные и неповоротливые протоны никогда не смогут конкурировать с подвижными электронами — тяжелый бомбардировщик никогда не сможет быть таким же маневренным, как легонький «ястребок». Все пилоты знают, что чем меньше масса машины, тем меньше ее инерция. Чуть повернулись рули управления, и истребитель резко меняет курс. Но даже при самой высокой маневренности инерцию все же надо учитывать, иначе любой истребитель пролетит по инерции мимо, не поразив нужную цель.

Возвращаясь к нашей теме, скажем, что электрон обладает ничтожной массой и ничтожной инерцией по сравнению с протоном и нейтроном. Значит, внешними силами можно мгновенно придать ему ускорение и заставить проделать самый сложный «вираж». Подано напряжение — электрон мгновенно набрал огромную скорость. Изменился знак напряжения — электрон «с ходу» летит назад.

Это свойство, пожалуй, одно из важнейших. Без него невозможно было бы 25 раз в секунду «рисовать» изображение на телеэкранах; создавать частоту колебаний, при которой ток в цепи в течение каждой секунды успевает изменять ве-



личину и направление до 10 миллиардов раз; управлять быстро летящей ракетой и в течение часа делать на электронных машинах такие расчеты, на которые человеку пришлось бы потратить несколько лет.

Кое-что о фотонике

Помимо электрона, протона и нейтрона, современная физика знает уже около 200 разновидностей элементарных частиц. Неужели нет среди них таких же легких, подвижных, доступных, как электрон? Разумеется, есть. Например, фотон.

Если говорить о подвижности, то эта частица вообще

не знает покоя — она существует только в движении. А в покое она исчезает: ученые говорят, что *масса покоя фотона равна нулю.* Получить ее в чистом виде еще легче, чем электрон. Физикой установлено, что из фотонов состоит любой видимый свет. И не случайно в последние годы именно эта частица стала успешно конкурировать с электроном в целом ряде технических областей.

Если до последнего времени такие отрасли техники, как радиосвязь или локация, были монополией электроники, то теперь возникла новая отрасль, которая может с таким же правом именоваться фотоникой. Речь идет о квантовых генераторах (так называемых лазерах), которые усиленно разрабатываются в последние годы. Конечно, и здесь не обходится без решения сложных проблем. Фотоны не имеют заряда и поэтому не управляются электрическим полем, и их гораздо труднее, чем электроны, заставить совершать колебания с заданной частотой. Но эти трудности преодолеваются, и скоро наряду с электронной радиосвязью начнет внедряться фотонная.

Может быть, после этого отпадет нужда в электронике? Нет, фотонная техника электронику не изживет. Во-первых, помимо радиосвязи, у электроники есть другие задачи. А во-вторых, без электроники никакие фотонные приборы невозможно создать. Фотоны рождаются электронами: когда электрон в атоме изменяет свое состояние, — допустим, перескакивает с дальней от ядра орбиты на ближнюю, — атом излучает фотон.

Но обо всем этом говорить придется отдельно. А пока отметим одно: электрон не борется за монополию, и когда возникает необходимость выйти за рамки его возможностей, он с радостью дарит людям фотон.

Будут ли рядом с фотоникой и электроникой развиваться другие области техники, использующие свойства еще каких-то частиц? Как знать. Уже существуют гипотезы о возможности связи на нейтринных волнах или на волнах гравитационных. Но такие волны наукой еще не исследованы. Поэтому все современные средства радиосвязи основаны на взаимодействии электронов и электромагнитных волн.

А кто его видел?

Чудом мы называем то, что нельзя объяснить. Чудеса творят духи, волшебники, боги. Электронику создал человек. Он приручил электрон, познал его свойства, заставил решать

множество разных задач. Конструируя электронный прибор, инженер рассуждает об электроне: он будет вести себя так-то и так-то, сделает то-то и то-то, полетит туда или сюда.

Ну, а кто видел, как это все происходит? Да никто. В лучшем случае, можно увидеть след луча на экране или измерить сумму зарядов всех электронов, проходящих в течение каждой секунды по проводу, — электрический ток. Ток и луч — это потоки электронов, огромная масса движущихся частиц. А один электрон является слишком малой частицей, его не позволит увидеть ни один микроскоп.

Каждый осматривал телевизор снаружи. Любопытный же человек обязательно слазит и внутрь. Ну и что? Ничего особенно интересного. Много всяких деталей, сложная сеть проводов. Тускло светятся лампы, и... никакого движения. Мертвое царство. Живет только экран.

Как же рождаются подвижные изображения в неподвижных деталях и проводах? Кто заменяет в спектаклях живых актеров, как разыгрывается на телеэкране напряженный спортивный матч? Главную роль здесь играет электрон.

Пока идет действие на экране, во всех элементах, находящихся внутри телевизора, течет невидимая, но напряженная «закулисная жизнь». Инженер изучил ее очень подробно. Он может ответить вам, сколько именно электронов пройдет через каждый провод в течение каждой секунды и как они будут вести себя в каждом звене. Хотя он тоже ни разу не видел электрона в глаза.

На первый взгляд все это кажется чуть ли не чудом. Электрон стал играть всевозможные роли. Он заменяет акте-







ров в телеспектаклях и выступает «певцом за сценой», заставляя динамик приемника воспроизводить звук. Он управляет ракетой, станком, самолетом, делает сложные вычисления и переводы, обрабатывает металлы, дает возможность изучать микроструктуру веществ.

Никто не видел его за работой, он, словно невидимый сказочный гномик, творит все новые и новые чудеса. Но знания и сила воображения исследователей позволяют представить во всех деталях, как подвижные электроны ведут себя в различных устройствах, которые создал человек.

Но каков же сам электрон? Как он устроен? Сплошной он или полый? Однородный или составлен из каких-то частей?

Об этом пока ничего не известно. На сегодняшний день электрон является своеобразным порогом, через который наука переступить пока не смогла. А переступит ли?

Переступит! Так же, как от молекулы она смогла перейти к атому, а от атома к изучению более мелких частиц. В руках науки материя все равно что матрешка в руках любознательного мальчугана: хочется раскрыть ее дальше и дальше, чтобы узнать, что там внутри.

Молекула. Атом. Ядро. Протон. Нейтрон. Электрон... Беспределен процесс познания, а материя бесконечна, причем не только вширь, но и вглубь. В природе, по всей видимости, не существует единого электрона, а есть сгусток волн или система каких-то еще более мелких частиц. И вдруг в один прекрасный момент электрон как таковой из науки исчезнет... Вот будет номер!

Что же станет тогда с электроникой? Да ничего! На ней это не отразится. Вот уж действительно чудо: нет электронов, а электроника есть! А ничего здесь нет особенно странного. Приборы, созданные электроникой, будут по-прежнему служить человеку, и в конце-то концов не столь важно, что там является главной деталью — сгусток волн, однородная сплошная частица или система связанных воедино частиц. Главное, чтобы наши представления не расходились с данными опыта, а каждый новый успех электроники — это опытное подтверждение справедливости лежащих в ее основе идей. Так пусть же будет пока частица — ведь все равно этой частицы никто не видел.

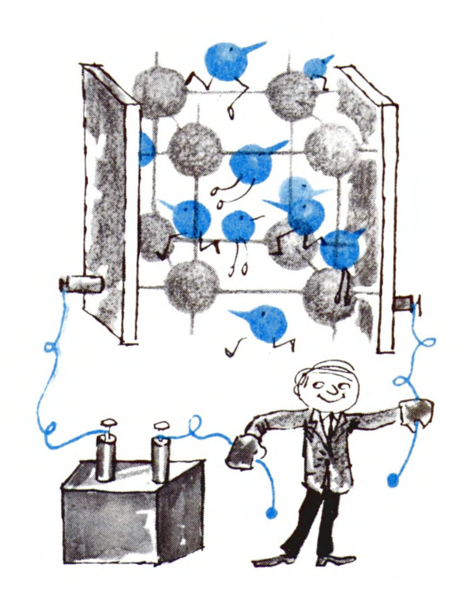
Все огромное здание электроники строилось умозрительно, усилиями многих изобретательных и пытливых умов. Начиная с момента открытия электрона, когда физик Гельмгольц не ощутил, не воспринял на слух, не увидел, а догадался, что в электролизе должен участвовать электрон.

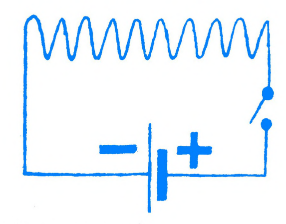


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

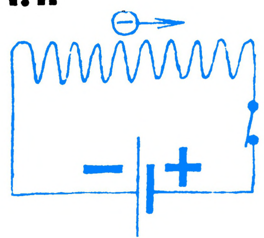
I.10

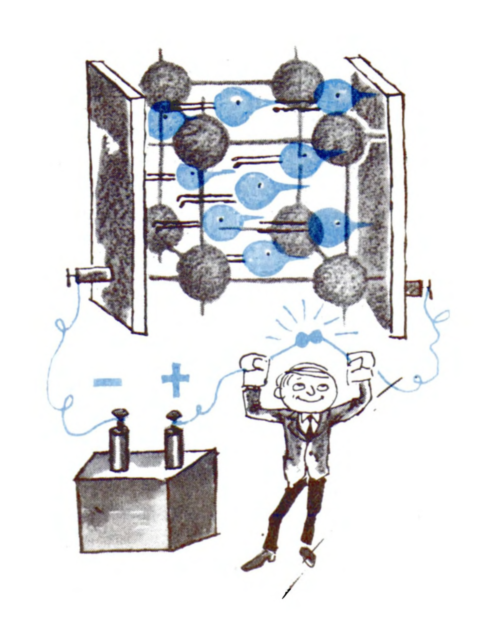
Атомы металла образуют *кристаллическую решетку,* а в пространстве между узлами решетки хаотично движутся свободные электроны, бродят бесцельно туда и сюда.





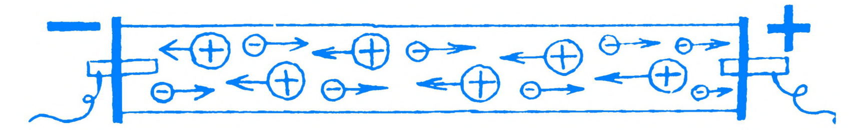
I.11



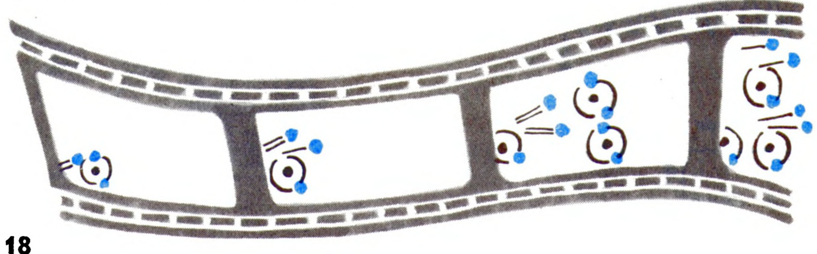


Стоит лишь подключить металлическую пластину к двум полюсам источника напряжения, и у электронов сразу появится цель. Они устремятся к положительному полюсу батареи — в металле возникнет *электрический ток.*

I.12

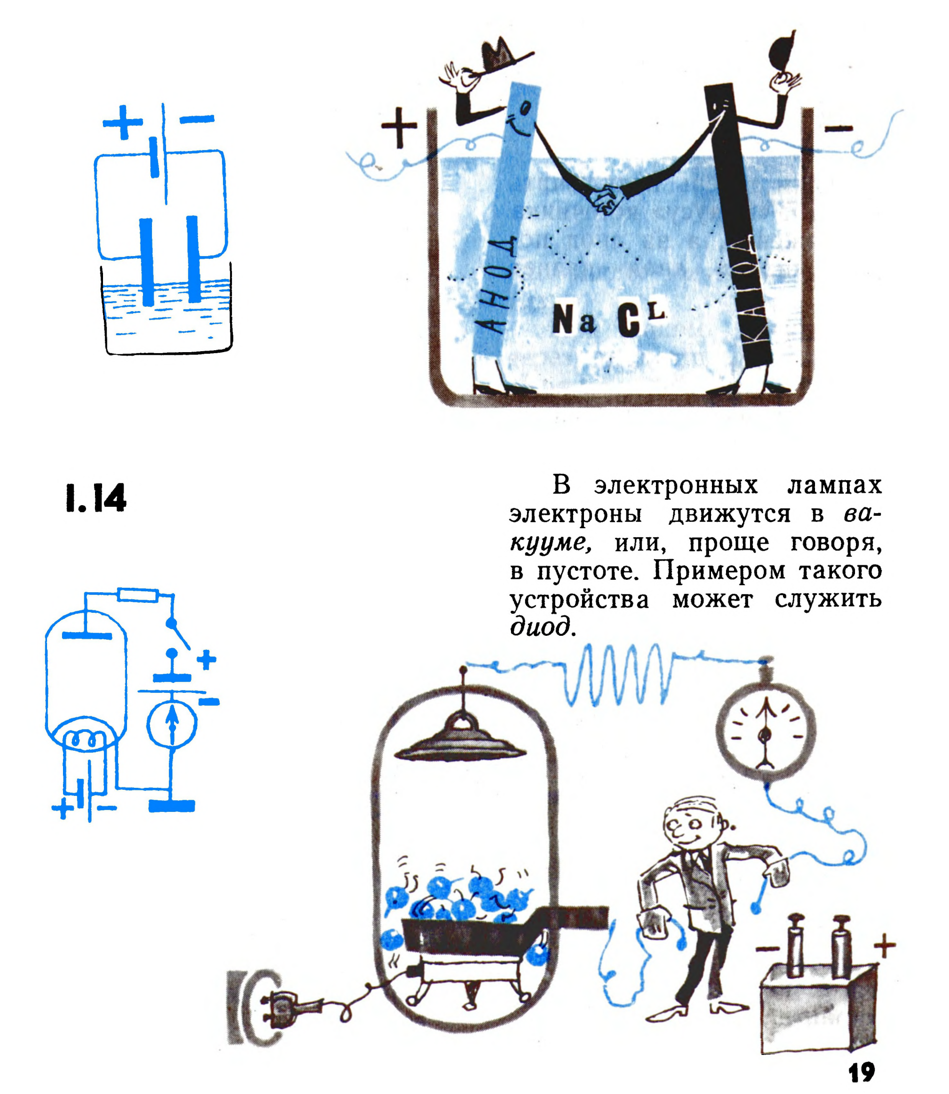


Электрический ток может возникнуть и в газе. Под действием напряжения внутри трубки происходит ионизация газа: свободные электроны устремляются к пластине с положительным потенциалом и по дороге, ударяясь об атомы, срывают электроны с их орбит. Положительные ионы (атомы, потерявшие свои электроны) движутся к противоположному концу трубки. Характерное свечение газа в трубке свидетельствует о том, что внутри нее движутся навстречу друг другу ионы и электроны — течет электрический ток.



I.13

Чтобы создать *электрический ток в жидкости* (например, в растворе поваренной соли), надо погрузить в эту жидкость два металлических стержня и подключить их к источнику напряжения. Стержни при этом становятся *электродами:* тот, что подключен к «плюсу» источника, будет служить *анодом,* а соединенный с «минусом» превратится в *катод.*



I.14

В электронных лампах электроны движутся в *вакууме,* или, проще говоря, в пустоте. Примером такого устройства может служить *диод.*

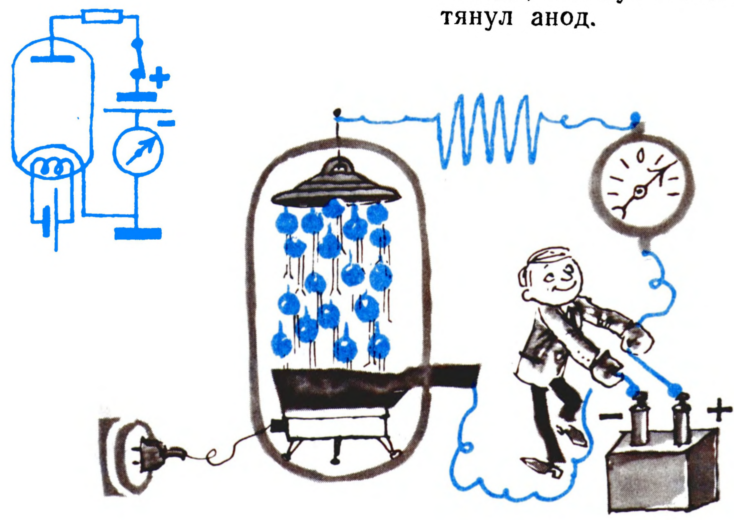
У диода внутри баллона помещены две основные детали, которые также называются анодом и катодом.

Рядом с катодом расположена нить накала — миниатюрная электроплитка, которая нагревает катод. При этом «электронная жидкость», состоящая из электронов, хаотично движущихся в самом теле катода, между его атомами, начинает «кипеть». Это явление называют *электронной эмиссией*. В результате эмиссии вокруг катода образуется облако «электронного газа».

I.15

Если теперь подключить катод к «минусу» источника напряжения, а на анод подать «плюс», анод начнет притягивать к себе электроны из облака, «отсасывать» их от катода, внутри диода будет течь ток.

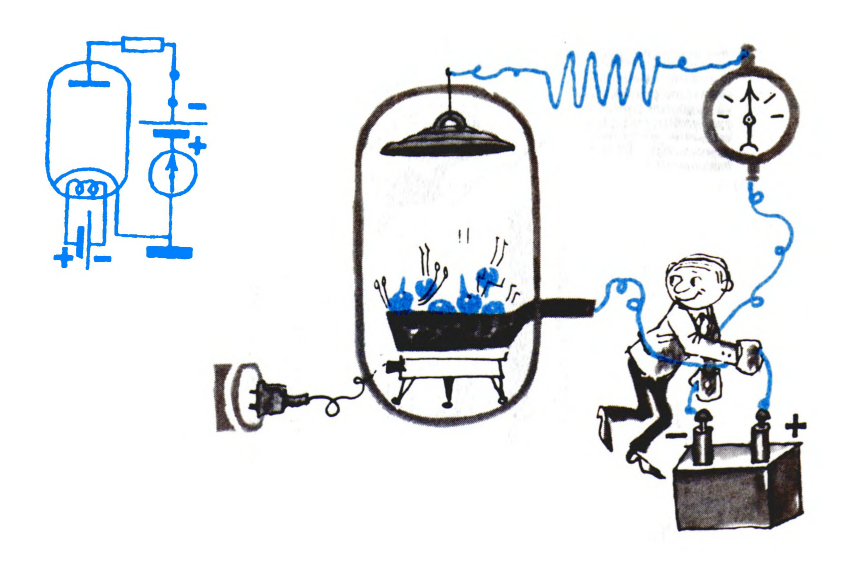
Свобода для электрона оказалась очень недолгой: едва лишь он вырвался из катода, как тут же его притянул анод.



I.16

Диод часто используют в схемах в качестве вентиля, а «вентиль» по-русски — «кран».

На рисунках I.15 «кран» был открыт. Чтобы закрыть его, надо поменять полюса источника: на анод подать «минус», а на катод — «плюс».



Теперь электронам труднее вырваться за пределы катода, так как он стал их притягивать. Но даже и тем, что вырвались, лететь-то особенно некуда: раньше их притягивал анод, а теперь он толкает их назад к катоду.

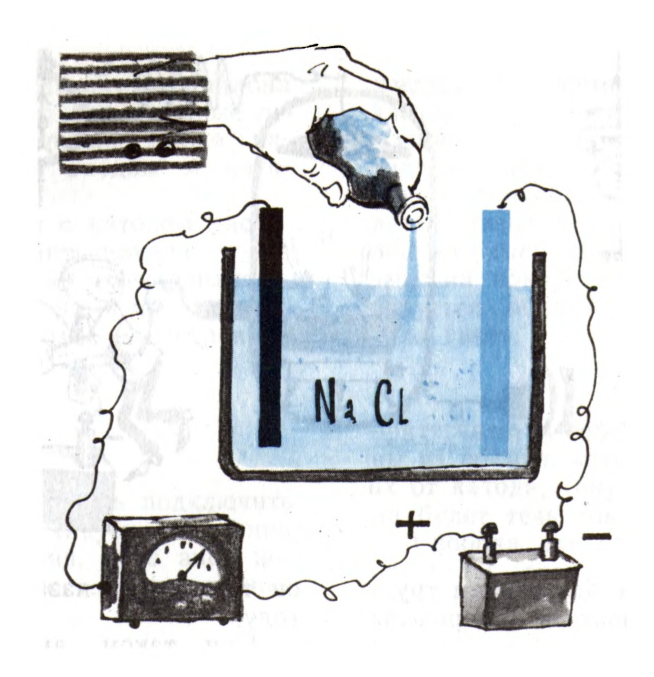
При таком включении через диод ток не течет. «Кран» перекрывает электрическую цепь, в которую включена эта лампа.

Путешествие в ванне

Электролиз известен каждому школьнику. Если в ванну с раствором поваренной соли погрузить два металлических стержня и подключить их к разным полюсам электробатареи, через раствор и по внешнему проводу потечет электрический ток (см. I.13).

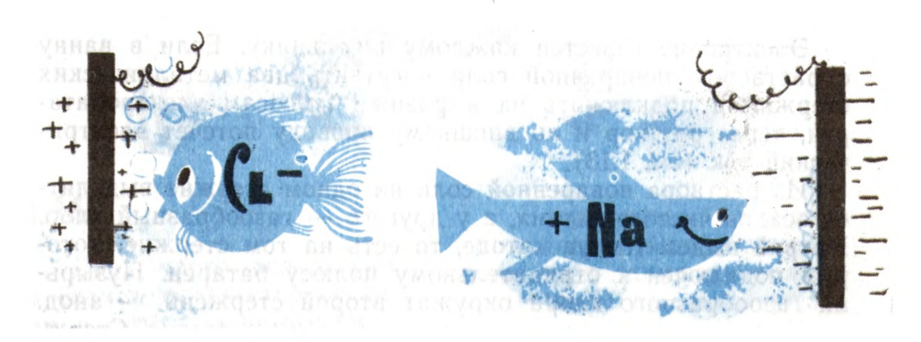
Из раствора поваренной соли на одном стержне выделится осадок чистого натрия, а у другого — газообразный хлор. Натрий выделится на катоде, то есть на том стержне, который подключен к отрицательному полюсу батареи. Пузырьки газообразного хлора окружат второй стержень — анод.

Пока разговор идет о вещах видимых и ощутимых. Стерж-



ни можно потрогать руками. Раствор соли поддается анализу. На катоде можно увидеть следы чистого натрия и наблюдать, как бурлит у анода газообразный хлор. Но чем все это вызвано? Почему под воздействием тока жидкость вдруг превращается в газ и твердое вещество? Хлор устремился к аноду, а натрий осел на катоде. А почему не наоборот?

Вот тут уж нам придется покинуть мир осязаемый и совершить вслед за учеными фантастическое путешествие



в иной, невидимый мир. Какой вид транспорта нас сможет туда доставить? Разумеется, необычный. Говоря языком поэтов, мы полетим туда на крыльях фантазии: ведь электроны нельзя увидеть, их можно только вообразить. Зато представив себе, в чем заключается роль электронов в этом процессе, мы сможем понять весь его внутренний механизм.

Что же здесь происходит? Тому, кто знаком со строением атома, понять процесс электролиза очень легко. Дело в том, что атомы натрия очень охотно отдают находящийся на их наружной орбите один-единственный электрон.

Отдав электрон, атом перестает быть нейтральным: число электронов стало меньше, чем число протонов в ядре. Теперь он положительно заряжен, и потому это не просто атом, а атом-путешественник. Путешественника по-гречески называют «ионом». А путешественник не любит долго оставаться в покое. Если поблизости есть пластина, соединенная с «минусом», он сразу отправится в путь.

Атомы хлора, напротив, охотно приобретут электроны. Их наружная оболочка содержит только семь электронов. Восемь электронов на наружной орбите атомов составляют «полный комплект».

Есть всеобщий закон природы: если у атома на наружной орбите недостает одного или нескольких электронов, он стремится добрать их извне до «полного комплекта».

Потому атом хлора, подчиняясь этому закону, и отнимает у атома натрия недостающий восьмой электрон.

Взяв вместо туристской путевки восьмой электрон, атом хлора приобретает порцию отрицательного заряда и тоже становится ионом — он путешествует в том направлении, где есть положительный электрод. Достигнув цели своего турне (то есть анода), ион сдает приобретенную им путевку — восьмой электрон.

Электрон побежит по внешнему проводу, а поскольку к аноду вновь и вновь прибывают «туристы с путевками», по проводу непрерывно бегут электроны — течет электрический ток. А внутри ванны ток имеет другую природу: здесь «путешественники» непрерывно движутся навстречу друг другу — отрицательные ионы хлора стремятся к аноду, положительные ионы натрия спешат попасть на катод.

Достигнув катода, ионы натрия отнимают у него недостающие им электроны и, став нейтральными атомами чистого натрия, покрывают катод.

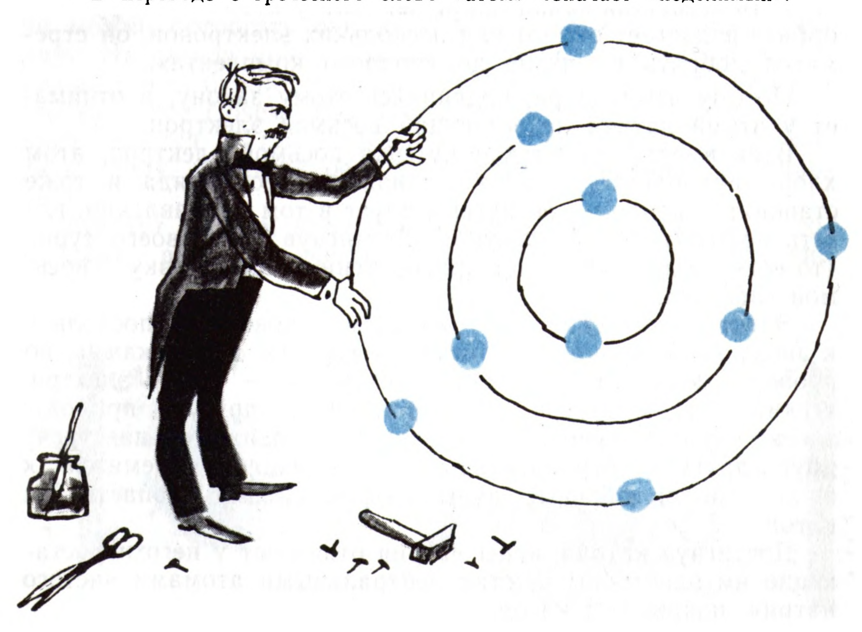
Порция электричества

Хорошо рассуждать об электронах на оболочках атома тому, кто с ними знаком. А каково было Гельмгольцу? Ведь он изучал электролиз в то время, когда атом еще считался действительно атомом — мельчайшим и неделимым кирпичиком вещества *.

Об электронах никто не имел представления. По весу выделившегося натрия могли узнать, сколько атомов натрия пришло на катод. Измерив ток, текущий по внешнему проводу, определили перенесенный этими атомами заряд. Установили, что одним и тем же количеством атомов натрия всегда переносится один и тот же заряд. Но если в ванне вместо поваренной соли растворен, к примеру, хлористый кальций, то тем же количеством атомов кальция переносится вдвое больший заряд.

Вот, собственно, и все данные, которыми располагал в то время Гельмгольц. Но их оказалось достаточно для гениальной догадки: в природе есть наименьшая порция электричества, своеобразный электрический атом. Каждый ион натрия

* В переводе с греческого слово «атом» означает «неделимый».



несет одну порцию электричества, каждый ион кальция — две. Не полторы и не 1,75, а именно две — два «электрических атома».

Гельмгольц, конечно, и сам не подозревал, что ему удалось впервые проникнуть мысленным взором внутрь того самого атома, который до этого был неделимым. Ведь порция электричества — это и есть электрон. На наружной орбите атома кальция вращается не один, как у натрия, а два электрона. Отдав эти два электрона двум атомам хлора, он становится несущим двойную порцию ионом. Потому-то и получается, что тем же количеством атомов кальция переносится вдвое больший заряд.

Все это стало известно значительно позже, после того как Резерфорд создал модель планетарного атома, в котором ядро заменяет Солнце, а электроны вращаются на орбитах наподобие наших планет (см. I. 1).

Но именно порция электричества, обнаруженная Гельмгольцем, привела науку к этим открытиям, позволила сделать первый и, пожалуй, самый решительный шаг.

Космос в баллоне

Идея Гельмгольца породила много вопросов. Что за порция электричества? Чем она переносится? Что собой представляет? Из чего состоит?

Эксперименты, проделанные вскоре после открытия Гельмгольца, подтверждали, что во всех явлениях, связанных с электричеством, в самом деле участвуют мельчайшие отрицательные электрические заряды: их стали называть электронами. Но что же все-таки представляют собой электроны? Бестелесную порцию электричества или кусочек какого-то вещества?

Оказалось, ни то ни другое. Хотя электрон и обладает массой, но он не является веществом. Это частица материи, которая входит в состав всех существующих в природе веществ.

В истории физики электрон занял почетное место: он был первой частицей, положившей начало изучению большого семейства элементарных частиц.

С момента открытия электрона физики начали проявлять к нему самый живой интерес. Установили, что внутри всех металлов живут свободные электроны, нечто вроде особой жидкости, разлитой по пустому пространству между атомами металла (см. I.10).



Как же смогли заглянуть внутрь металла и увидеть там электроны, которых видеть нельзя?

Конечно, с помощью опытов. Опыт — фундамент всей электроники, источник ее достижений, высший судья при оценке ее идей. А потому давайте войдем в мир электроники так, как входили в него ученые: не с пустыми руками, а с электрической батареей и кусочком металла — металлической пластинкой — в руках.

Мы подключаем пластинку к «плюсу» и «минусу» батареи, и сразу у всех электронов, бесцельно бродивших внутри пластинки, появляется цель (см. I. 11). Теперь отключим пластинку от батареи и станем ее нагревать. Начнется эмиссия электронов. Вокруг нагретой пластинки образуется облако электронного газа (см. I. 14).

Если электронов никто не видел, то и электронного облака — тоже. И тем не менее современная физика обращается с электронами почти так же уверенно, как в известной пословице повар с картошкой: для каждого «электронного блюда» есть готовый рецепт.

Хотите быстрей «вскипятить» «электронную жидкость»? Возьмите никель или вольфрам. Они дают наибольшее «испарение» электронов, и притом весьма тугоплавки — их можно разогревать до очень высоких температур. А еще лучше покрыть пластинку из никеля или вольфрама оксидной пленкой — окислом щелочноземельных металлов. «Испарение» будет еще эффективнее. Возрастет интенсивность эмиссии, скажет специалист.

Каждый знает, что радиоприемник, прежде чем принимать трансляцию, должен прогреваться 2—3 минуты. Однако не всем известно, что именно в это время рождаются и увеличиваются невидимые облака электронов, окружающие катоды всех ламп.

Движение в облаке хаотично, единственной целью, которая заставит все электроны двигаться в одном направлении, может служить металлическая пластинка, имеющая положительный потенциал. Ну что ж, за этим дело не станет. У нас есть батарея. У батареи есть «минус» и «плюс».

Подключим «минус» к пластинке, окруженной облаком электронного газа, а рядом расположим пластинку, на которую подадим «плюс». Возникнет ли ток в подобном устройстве?

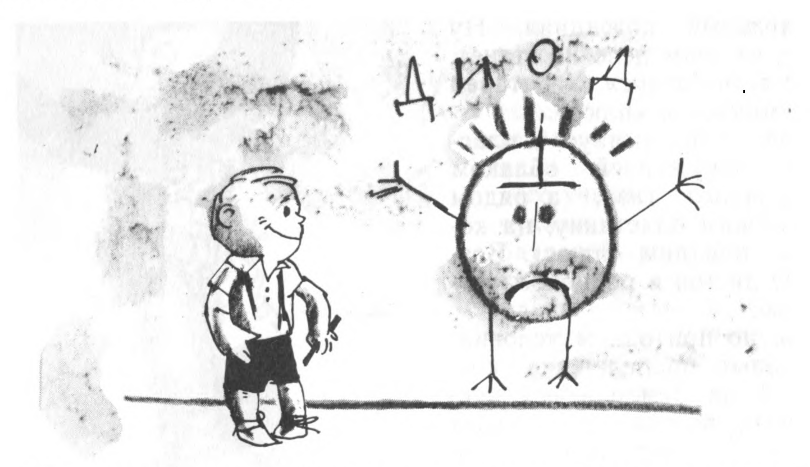
Да, но при одном условии: если опыт проделан... в космосе. А на Земле этому препятствует воздух — он мешает электронам, вырвавшимся за пределы катода, лететь на анод. Чтобы избавиться от влияния воздуха, Эдисон поступил очень просто: он создал «космос в миниатюре» — поместил обе пластинки внутри стеклянного баллона, из которого выкачал воздух. И увидел впервые, как в этих условиях между пластинками, не соединенными проводом, течет электрический ток.

Если вы захотите проделать подобный опыт, вам не понадобится самим создавать «космос в баллоне», вы можете взять (купить в любом магазине радиодеталей) готовую двухэлектродную лампу — диод (см. I.14).

Диод был изобретен англичанином Флемингом в 1904 го-



ду. Но до наших дней принцип его остался почти неизменным. В основном менялась конструкция. В диоде Флеминга и в ряде последующих конструкций диодов ток накала подводился прямо к катоду. Существенным усовершенствованием было введение нити накала, которую впервые предложил русский ученый А. А. Чернышев.



Подключив диод к батарее, вы можете наблюдать появление тока по включенному в цепь диода амперметру — прибору, измеряющему электрический ток. Отклонение стрелки прибора — это единственный видимый результат всех описанных нами явлений. Все остальные процессы незримы. И тем не менее внутри баллона происходит именно то, о чем мы говорили: электроны, вырвавшись из катода, образуют вокруг него электронное облако, анод будет притягивать электроны, внутри баллона потечет электрический ток.



I.17

Среди многих деталей, помещенных внутри электронной трубки, вы тоже можете обнаружить нить накала, катод и анод.

Анод электронной трубки не похож на анод диода: он выполняется в виде цилиндра. Электроны летят от катода к аноду и, проскочив сквозь него, ударяются об экран. Экран покрыт специальным составом, который начинает светиться в том месте, куда упал электрон.



I.18

Чтобы направить все электроны, вылетающие из катода, в одну точку экрана, необходимо собрать их в тонкий луч. Электроны противятся этому и отталкивают друг друга, так как все они имеют одноименный заряд (отрицательный). В результате луч «разбухает», и если бы он упал на экран в таком виде, то на экране образовалось бы размазанное большое пятно.

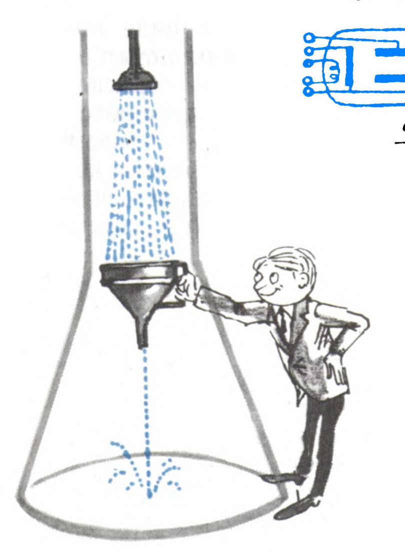


I.19

фокусирующий электрод

отклоняющие пластины

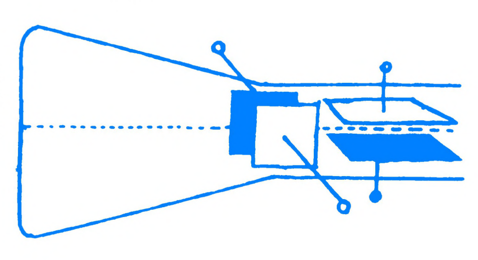
анод



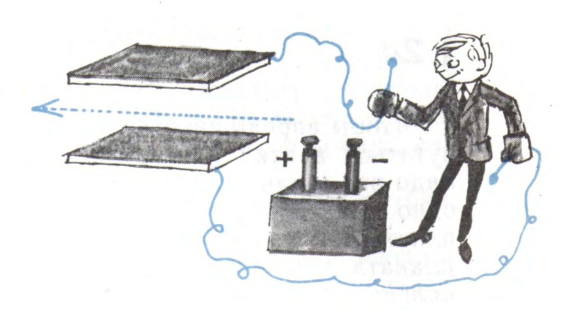
Побороть «своенравие» электронов помог фокусирующий электрод. Выполненный тоже в виде полого цилиндрика, он подключается к отрицательному полюсу источника напряжения, и потому его стенки отталкивают разбегающиеся электроны и собирают их в тонкий пучок, направленный вдоль продольной оси цилиндра.

I.20

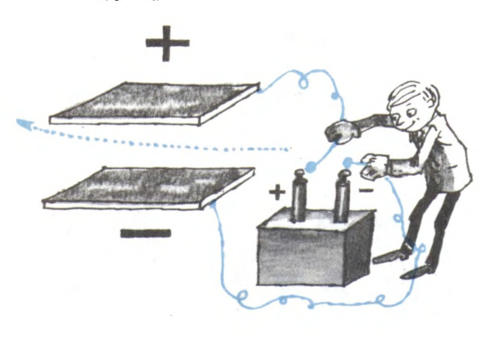
По пути от катода к экрану электрон пролетает мимо пластин. Если на них



нет напряжения, электрон их не заметит и полетит к центру экрана. Вместе с ним туда летят все другие его собратья и создают в центре экрана светящееся пятно.



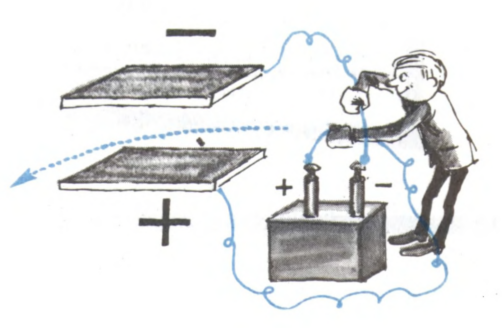
I.21



А что будет, если к одной паре пластин приложено напряжение? Все электроны отклонятся в сторону положительной пластины, и пятно сместится от центра экрана вверх.

I.22

Изменив на пластинах знаки приложенного напряжения, можно сместить пятно вниз.



I.23

Вторая пара пластин позволяет смещать луч и пятно влево и вправо.



I.24

Чтобы впредь никогда не путаться в этих пластинах, надо раз и навсегда усвоить одно перекрестное правило: пластины в левой части плаката, хотя и стоят вертикально, отклоняют луч влево и вправо, и потому их называют горизонтально-отклоняющими пластинами.

Те же пластины, которые лежат в горизонтальной плоскости, называют вертикально - отклоняющими пластинами, так как они отклоняют луч или вверх, или вниз.

Две пары пластин являются своеобразным прицельным устройством, которое позволяет обстрелять любую точку экрана, направив в нее луч.



Вооруженные «пушкой»

Диод — это уже электроника. Он был создан для вполне конкретных технических нужд. А на первых порах никаких технических нужд еще не было. Не было и электроники — было лишь естественное желание физиков изучить электрон. Поэтому еще за 40 лет до изобретения двухэлектродной лампы (диода) появилась электронная трубка, созданная физиками как сугубо экспериментальный прибор.

В то время никто не мог предполагать, какое разностороннее применение уготовано в будущем трубке. В локации и телевидении, при получении сигналов из космоса, во многих

лабораторных исследованиях, в устройствах, запоминающих данные, обработанные электронной машиной, без этой трубки не обойтись. Но физики Плюккер, Кирхнер, Гитторф, Крукс, Перрен и Виллар, проводившие первые опыты с трубкой, имели цель куда более скромную: они хотели понять, как ведет себя электрон.

Устройства, создающие управляемый луч внутри трубки, кто-то метко назвал «электронными пушками».

В самом деле: электроны подобны ядрам, а положительный потенциал анода заменяет давление газов, выталкивающих ядро из ствола. Стволом служит фокусирующий электрод, обеспечивающий кучность стрельбы (см. I.19). Управляющие пластины подобны орудийным прицельным устройствам (см. I.20—I.24).

Кто мог знать, что устройство это со временем оправдает воинственное название «пушка» и будет помогать настоящим орудиям поражать без промаха вражескую цель?

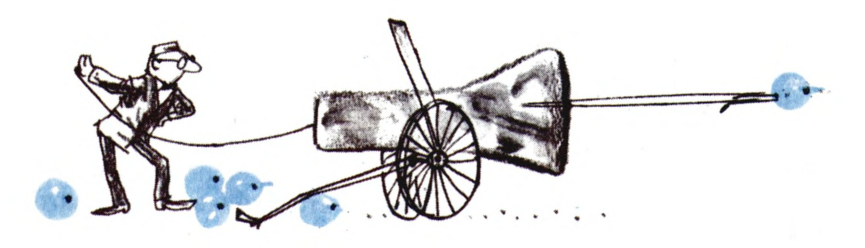
Но к тому времени, когда «электронная пушка» нашла применение в индикаторах радиолокационных станций, у нее уже было немало всякого рода мирных заслуг.

Еще 100 лет назад физики занимались исследованием природы лучей (в то время они носили название «катодных лучей»), создаваемых «электронными пушками».

Сначала установили, что эти лучи всегда отклоняются к той пластине, к которой подключен положительный полюс источника. Отсюда был сделан вывод, что луч представляет собой непрерывный поток частиц, обладающих отрицательным зарядом.

Затем удалось измерить скорость и вычислить массу этих частиц. Так «электронная пушка» помогла познать свойства невидимых электронов, превратив их из бестелесной порции электричества в частицы «во плоти и крови».

Впоследствии с помощью точно таких же «пушек» инженеры сумели получать четкие изображения кадров на телевизионном экране. А за много лет до создания телевидения был разработан лабораторный прибор осциллограф, позво-



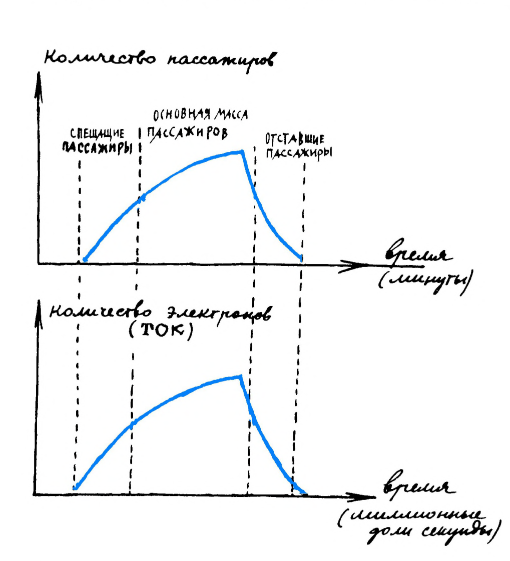


ливший наблюдать многие электрические процессы, которые раньше исследователи могли только воображать.

Возьмем, к примеру, электрический импульс. Что он собой представляет? Толчок, который создается множеством электронов, пробегающих одновременно по проводам и элементам схем.

Последите при случае за эскалатором на одной из станций метро. Он загружен неравномерно. Когда на перрон прибывает поезд, все пассажиры устремляются к эскалатору. Тот, кому особенно некогда, мчится сюда бегом. Затем идет основная масса — на лестнице стало особенно тесно. А дальше на эскалаторе пусто. Импульс кончился. С приходом следующего поезда цикл повторяется вновь

Картина эта сходна с тем, что происходит в импульсных схемах. Поезда метро можно сравнить с генератором импульсов, эскалатор — с участком провода, а пассажир в данном случае ведет себя так же, как электрон.



И график, изображающий изменение тока во времени, очень похож на график, на котором отражено количество пассажиров, доставленных эскалатором наверх.

Однако в отличие от событий в метро, длящихся многие минуты, электрический импульс обычно появляется и исчезает за миллионные доли секунды. Разве можно за такое короткое время что-нибудь рассмот-

реть? Кто успеет заметить импульс, который рождается и умирает в течение миллионных долей секунды?

Оказывается, торопиться здесь вовсе не нужно. Мгновенные импульсы могут оставить след на экране, и след этот будет сохраняться достаточно долго, чтобы инженер или ученый могли оценить его форму, проследить, как за коротенькое мгновенье нарастает, держится и исчезает электрический ток.

Эту возможность дают инженерам электронные трубки.

След невидимок

Миллионная доля секунды... Время настолько ничтожное, что его даже трудно вообразить.

Мировой рекордсмен по бегу, пробегающий стометровку за 9,8 секунды, за одну миллионную долю секунды преодолевает... одну сотую миллиметра.

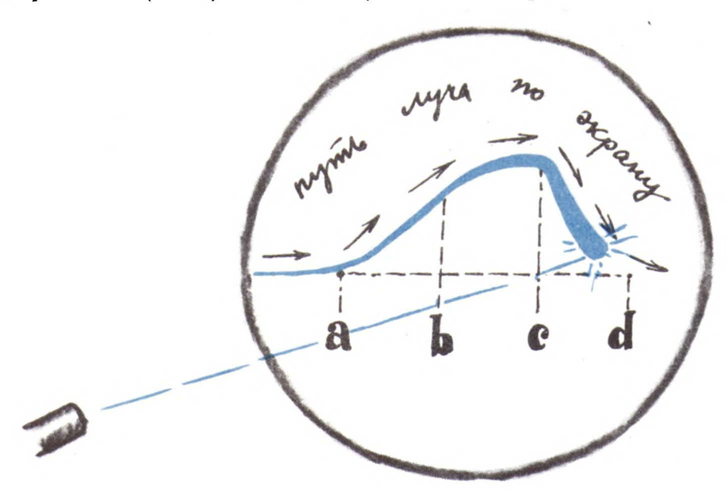
Всего три десятых миллиметра пролетит за это короткое время реактивный самолет. А ведь он летит со скоростью звука! Ракета, несущая спутник на орбиту с космической скоростью, всего на 8 миллиметров удалится от нашей Земли.

А в электронной схеме за миллионную долю секунды происходит столько событий, что рассказ о них может длиться часами.



Электроны «живут» в ином временном масштабе. Они настолько подвижны и расторопны, что за одну миллионную долю секунды успевают сделать множество разных дел.

...Импульс длился одну миллионную долю секунды. В это время луч электронной трубки, двигаясь слева направо успел пересечь экран. В тот момент, когда луч начинал свой бег, импульс попал на вертикально-отклоняющие пластины и отклонил луч вверх. Но отклонившись, луч продолжал бежать слева направо, и, когда импульс кончился, он вернулся (опустился) к середине экрана и закончил пробег. В результате остался след луча на экране. Это и есть график импульса: глядя на изображение, можно увидеть, как в течение миллионной доли секунды нарастал (участок *a—b*), держался (*b—c*) и падал (*c—d*) электрический ток.



Экран электронной трубки стал поистине чудо-экраном: на нем можно увидеть движение невидимых пассажиров на невидимых эскалаторах, то есть движение тока внутри проводов и других элементов схем.

Изображение на экране сохраняется недолго: экран покрывают специальным составом, который после пробега луча может светиться секунды или доли секунды. Но электронике очень редко приходится иметь дело с одиночными импульсами. Обычно они следуют друг за другом, и каждый из них заставляет луч отклоняться и обновлять свой след. Пока длится импульс, луч бежит по экрану слева направо. Затем он очень быстро, мгновенно возвращается к левому краю экрана, чтобы вновь повторить пробег.

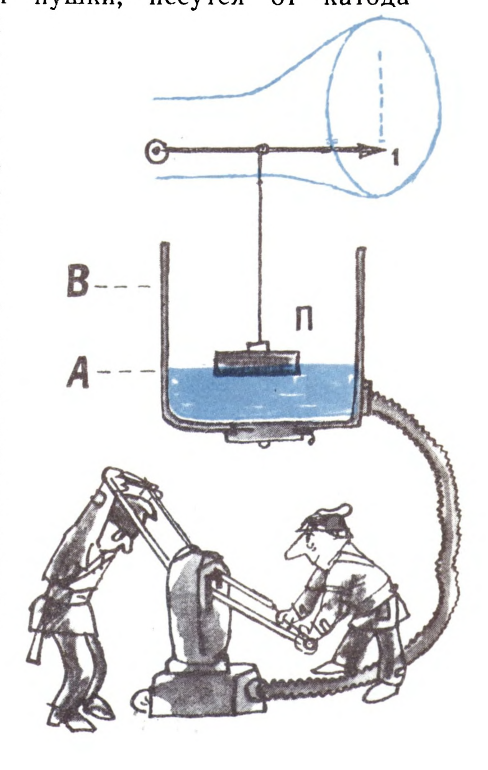
А что значит «очень быстро»? Слева направо луч бежал всего одну миллионную долю секунды. В этом случае скорость прямого хода (то есть пробега слева направо) составит в привычных нам единицах примерно 100 километров в секунду, или 360 000 километров в час. Если бы луч скользил не по экрану, а по земле, его след в течение часа десять раз обежал бы вокруг Земли!

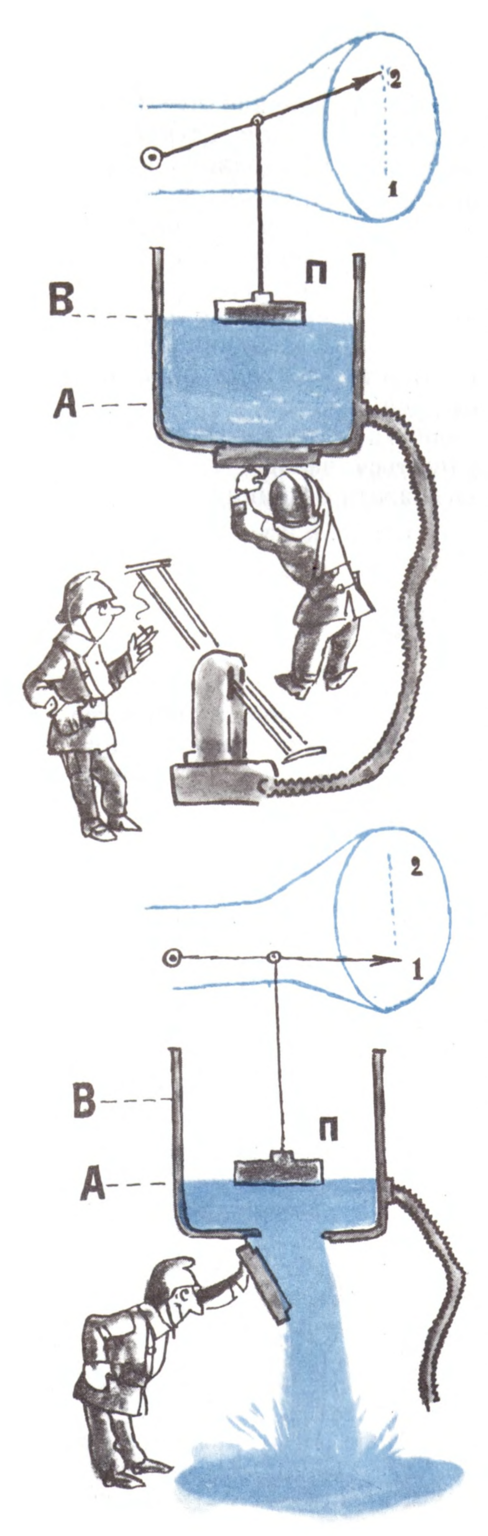
Разве это не быстро? Быстро. Но в электронике даже такая скорость еще далека от рекордной. Слева направо луч бежит быстро, а справа налево (то есть во время обратного хода) еще примерно раз в сто быстрей.

А от чего зависит скорость пробега? Что заставляет луч, добежав до края экрана, возвращаться назад? Чтобы ответить на эти вопросы, придется рассказать о принципах управления электронным лучом.

Почти по задачнику

Луч управляется электронами. Электронов в процессе участвует много: одни создают электрический импульс, другие, вылетев из электронной пушки, несутся от катода к экрану трубки, а третьи в то же самое время управляют лучом. Вот почему за одну миллионную долю секунды в электронной схеме происходит столько событий, что подробный рассказ о них мог бы занять часы. Мы не будем здесь обсуждать все детали. Но самого принципа управления электронным лучом стоит коснуться подробнее, ведь сейчас мы знакомимся с первым электронным прибором, в котором действием множества электронов создается единый сложный процесс. А поскольку процесс электронный неощутим и невидим, мы попробуем для начала обратиться к условной модели. В ней все «весомо, грубо, зримо», и тем





не менее она довольно-таки точно воспроизводит процесс управления электронным лучом.

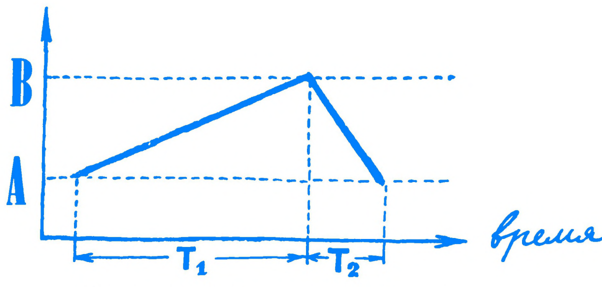
Представьте себе резервуар определенной емкости — допустим *С* литров, который через узкий шланг наполняют водою. За время T_1 уровень воды в резервуаре поднимется от *А* до *В*.

Поплавок *П*, поднимаясь по мере наполнения резервуара, поворачивает стрелку, которая в нашей условной модели играет роль луча. За время T_1 конец стрелки сместится вверх по экрану от точки *1* до точки *2*.

В этот момент открывается люк, расположенный в нижней части резервуара, и уровень вновь понижается от *В* до *А*. Поскольку люк шире, чем шланг, слив происходит намного быстрее, чем наполнение, допустим, за время T_2. При этом стрелка-луч вернется из точки *2* в точку *1*. Не правда ли, наша система напоминает те многочисленные бассейны из школьных задачников, в которых через трубу *А* вливается *x* литров воды в минуту, а по трубе *В* *у* литров утекает прочь? Но есть и различие. Там вода обычно течет по обеим трубам одновременно. А в нашей системе трубы действуют поочередно. Благодаря этому за время T_1 стрелка медленно поднимается, а затем быстро падает вниз за тремя T_2.

Описанный нами процесс

изображен графиком, из которого видно, как за время T_1 уровень медленно повышается от A до B, а за время T_2 быстро падает от B к A.



Теперь, наверное, легче понять, как протекает процесс в электронной схеме. «Резервуаром» является конденсатор C, «насосом» — источник тока E, а «шлангом» — большое сопротивление R_1.

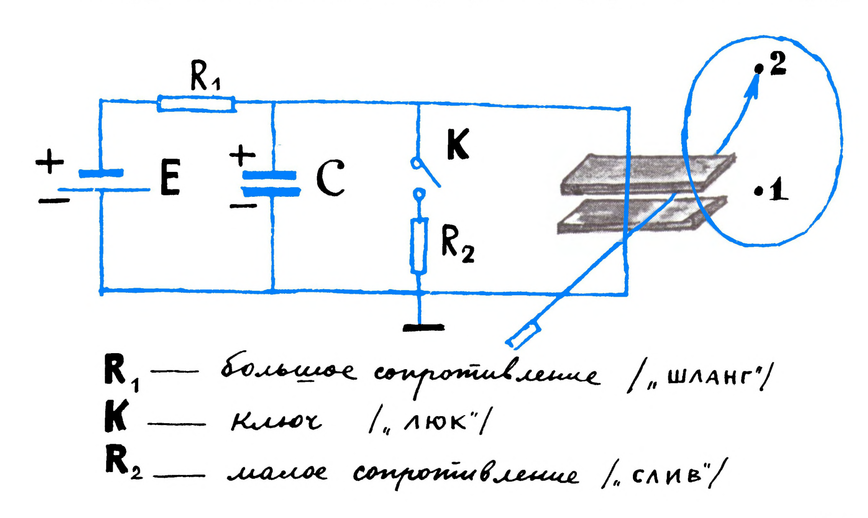
По мере того как заряжается конденсатор, растет уровень в «резервуаре» — в данном случае это уровень напряжения между обкладками конденсатора, который обозначают обычно через U_c.

Ключ K является своеобразным «люком»: он открывает путь току через малое сопротивление R_2 и тем самым дает возможность осуществиться «сливу». Поскольку сопротивление «слива» R_2 много меньше сопротивления «шланга» R_1, напряжение на конденсаторе очень быстро падает от U_c до нуля.

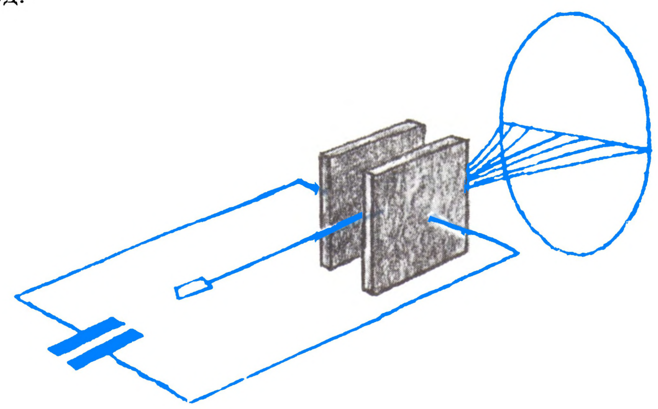
График процесса мы с вами уже изучили.

Вместо уровня воды в резервуаре по вертикальной оси будем теперь откладывать напряжение на конденсаторе U_c.

Нетрудно заметить, что график по форме подобен зубу.



Если процесс повторяется неоднократно, возникает несколько зубьев, а вместе они образуют пилу. Такое пилообразное напряжение и управляет лучом. Для этого конденсатор подключают к пластинам, расположенным горизонтально. Если тот же конденсатор подключен к вертикальным пластинам, луч смещается в горизонтальной плоскости. За время T_1 (длинный скос зуба) луч смещается слева направо, за время T_2 (короткий скос зуба) совершает быстрый обратный ход.



Надо заметить, что скорость луча зависит от скорости «наполнения резервуара», то есть от скорости нарастания напряжения U_c. Пока конденсатор заряжен мало, скорость эта почти постоянна и луч с постоянной скоростью пересекает экран. Чтобы выдержать скорость луча, емкость «резервуара» всегда выбирают с запасом, стараясь не заполнять его «до краев».

Чтобы понять до конца этот принцип, нам остается решить только один вопрос.

В нашей условной модели люк для слива резервуара в нужный момент открывали мы сами. А кто в приведенной схеме замыкает в нужный момент ключ *К*?

Эта задача решается с помощью трехэлектродной лампы — триода. Вот о ней-то у нас и пойдет теперь речь.

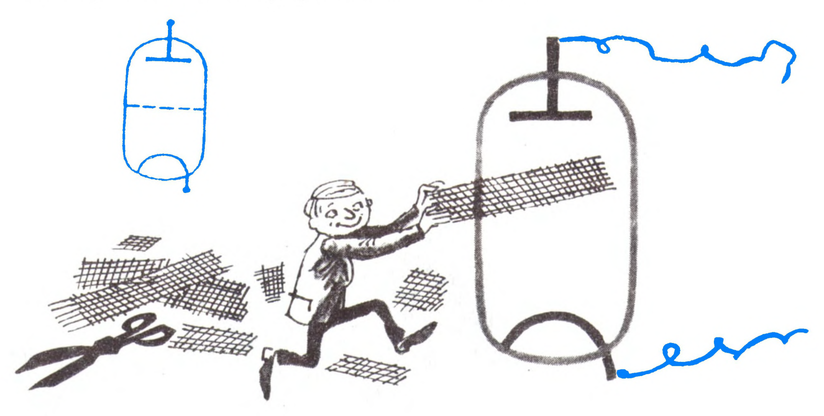


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

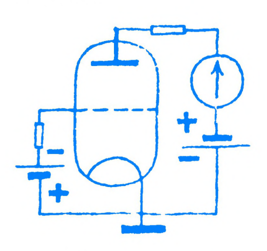
I.25

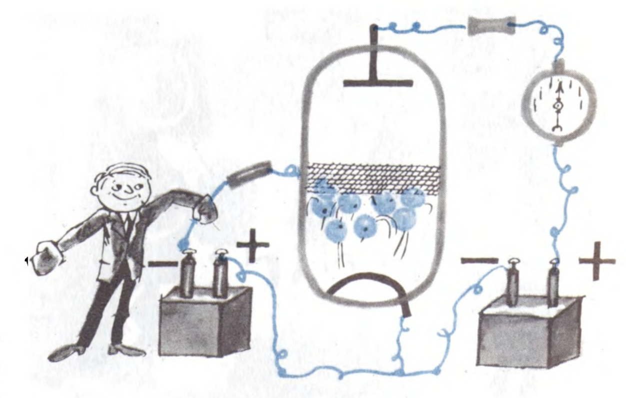
Введение между катодом и анодом рассмотренной нами лампы-диода третьего электрода (управляющей сетки) позволило управлять током, протекающим в лампе.

С появлением трехэлектродных ламп — их стали называть триодами — неизмеримо расширилась область использования электронных ламп.



I.26



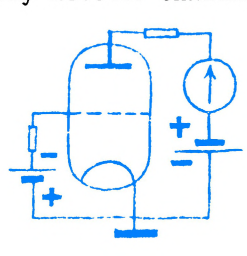


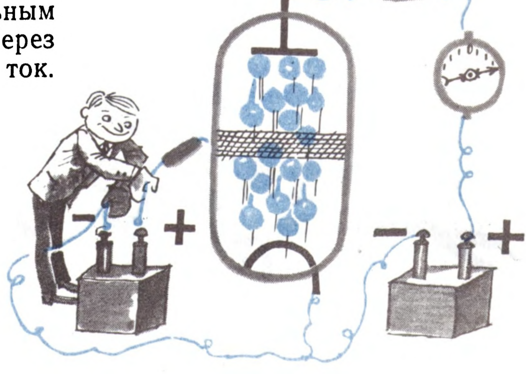
Управление током в триоде осуществляется с помощью напряжения, приложенного между катодом и сеткой. При большом отрицательном потенциале сетки (по отношению к катоду) она станет служить непреодолимым барьером для электронов. Они будут «толпиться» в пространстве между катодом и сеткой; лампа окажется запертой, так как от катода к аноду ток не потечет, несмотря на то, что так же, как и в диоде, к катоду приложен «минус», к аноду — «плюс».

I.27

Чтобы ликвидировать «столпотворение», достаточно изменить на сетке «минус» на «плюс». При положительном потенциале на сетке она будет оказывать помощь аноду, так как ее положительный потенциал сложится с положительным потенциалом анода. Через лампу потечет сильный ток.

Однако при слишком большом положительном потенциале на сетке она может превратиться из помощника анода в его конкурента: часть электронов будет притягиваться к ней и до анода не долетит. В лампе появится вредный сеточный ток.





I.28



Все, что было рассказано о процессах, происходящих в трехэлектродной лампе, можно изобразить кривой линией. Кривая показывает, как меняется анодный ток в лампе в зависимости от напряжения между ее электродами. Она называется характеристикой лампы.

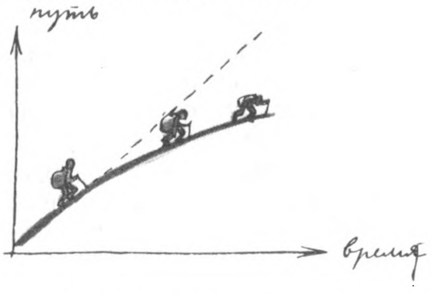
I.29

Характеристика лампы есть график.

Для чего вообще служат графики? Для наглядного изображения зависимости двух каких-нибудь величин. Ну, например.

Чем больше времени пешеход находится в дороге, тем больший путь он проходит. Так будет выглядеть график путника, если он шел с постоянной скоростью.

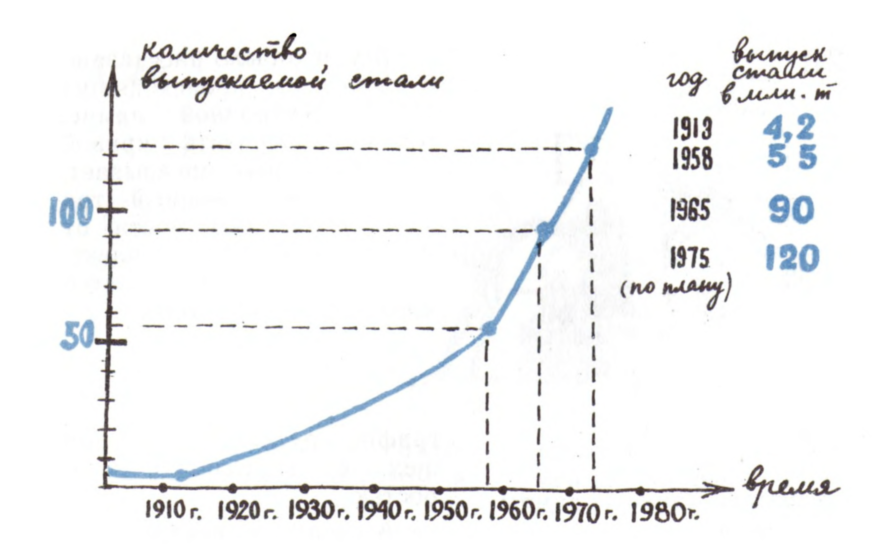
А если к концу пути пешеход утомился, график будет выглядеть так.



В этом случае говорят, что путь нелинейно зависит от времени: зависимость выражается не прямой линией, а кривой.

I.30

Всем хорошо знаком другой вид графика: рост выпуска какого-либо вида продукции. На рисунке представлен график выпуска стали. Зависимость здесь опять нелинейная: с годами выпуск стали растет все быстрей и быстрей.



В предыдущих примерах каждый график показывал, как какая-то величина (путь, количество стали) зависит от времени.

С таким же успехом можно выразить с помощью графика связь любых величин. Можно показать, как зависит дальность полета самолета от количества топлива; его скорость от силы двигателя; сопротивление воздуха от скорости полета и т. д. и т. п.

I. 31

Теперь вернемся к характеристике лампы. Зависимость анодного тока (J_a) от напряжения между катодом и сеткой (U_c) называют анодно-сеточной характеристикой лампы. Зависимость тока анода (J_a) от напряжения на аноде (точнее, от напряжения между катодом и анодом $U_а$) называют анодной характеристикой лампы.

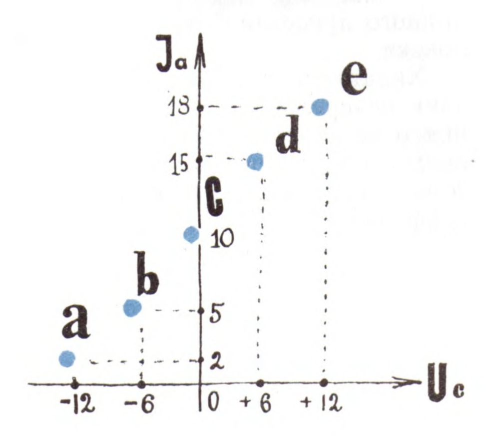
Анодно-сеточная характеристика снимается так. Пусть при напряжении $U_c = -12$ вольт анодный ток $J_a = 2$ миллиамперам (то есть 2 тысячных доли ампера).

Отложим —12 вольт на

горизонтальной оси графика, а 2 миллиампера — на вертикальной оси.

Пересечение двух прямых, параллельных осям графика, дает точку *a*.





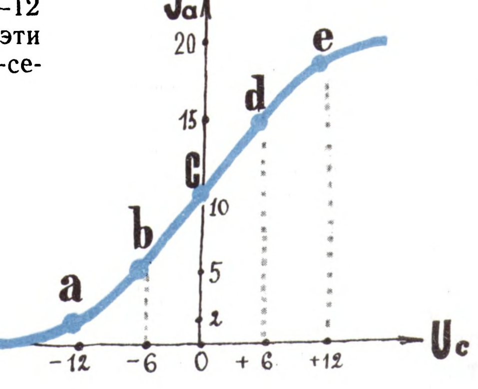
I.32

При разных значениях напряжения U_c и неизменном напряжении U_a получаем различные значения тока J_a. Откладывая эти значения на графике, получим точки *b, c, d*.

Отложив много точек для разных значений U_c от —12 до +12 вольт, соединим эти точки и получим анодно-сеточную характеристику лампы.

Как видите, в этом случае график опять нелинеен: у точки *a* ток нарастает медленно, между точками *b* и *d* — быстро (и, кроме того, линейно), а в точке *e* перестает расти.

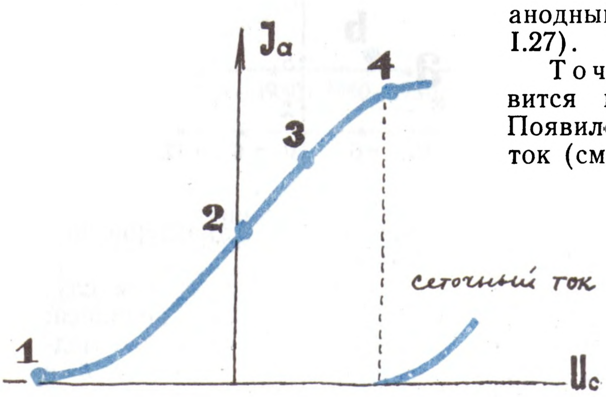




I.33

Самая подробная характеристика не может дать полного представления о человеке.

Характеристика лампы дает исчерпывающие сведения о ее поведении. На ней видны все процессы, о которых рассказано в параграфах I.26—I.27.



Точка 1. Велико отрицательное напряжение между катодом и сеткой. Сетка стала непреодолимым барьером для электронов. Анодный ток равен нулю (см. I.26).

Точка 2. Отключена батарея от сетки. Часть электронов летит на анод.

Точка 3. Положительный потенциал на сетке. Сетка помогает аноду, и анодный ток растет (см. I.27).

Точка 4. Сетка становится конкурентом анода. Появился вредный сеточный ток (см. I.27).

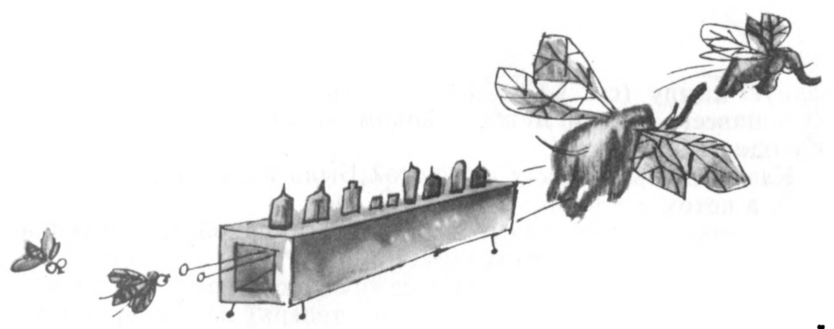
I.34

Характеристика позволяет определить, что при изменении U_c, например, от —6 до +6 вольт, то есть на 12 вольт, анодный ток изменяется от 5 до 15 миллиампер, то есть на 10 миллиампер (см. I.32).

Сигнал, действующий на сетке, обычно бывает намного слабее. Предположим, что напряжение между катодом и сеткой изменяется от —0,6 вольта до +0,6 вольта, то есть на 1,2 вольта. Анодный ток при этом изменяется на 1 миллиампер. (Кстати заметим, что на линейном участке характеристики существует прямая пропорциональность между напряжением и током.)

Если к аноду триода подключено сопротивление, равное 24 килоомам (24 тысячи ом), то колебания тока создадут в нем колебания напряжения с размахом:

$1 \cdot 10^{-3}$ амп.$\times 24 \cdot 10^3$ ом $= 24$ вольта.



Значит, поданные на сетку колебания 1,2 вольта превратились в 24 вольта в анодной нагрузке — лампа усилила колебания в 20 раз. Усиление объясняется тем, что сетка в триоде расположена рядом с катодом, и малейшие изменения потенциала на сетке приводят к заметному изменению анодного тока, а следовательно, к изменению напряжения в анодной нагрузке.

Включив последовательно несколько усилительных ламп (их называют также усилительными каскадами), можно усилить слабый сигнал в сотни тысяч и в миллионы раз.

Способность усиления — это очень ценное свойство триода, которое электроника использует буквально на каждом шагу.

С помощью сетки

5 октября 1956 года французский изобретатель Ли де Форест был удостоен высокой награды — ордена Почетного легиона. На торжественной церемонии вручения ордена присутствовал выдающийся ученый нашей эпохи физик Луи де Бройль. Выступая с приветственной речью, Луи де Бройль отметил, что имя Ли де Фореста стало одним из великих имен современной науки и техники благодаря открытию, сделанному Ли де Форестом полвека назад.

«Специалисты всех областей науки должны выразить Ли де Форесту свое почтение, свою признательность и свое восхищение», — сказал в заключение Луи де Бройль.

Что же это за великое открытие, вызывающее восхищение и признательность даже полвека спустя?

На первый взгляд оно вовсе не кажется таким грандиозным. За три года до открытия Ли де Фореста французский ученый Флеминг разработал уже знакомую нам двухэлект-

родную лампу (см. I.14 и I.15). А Ли де Форест предложил всего-навсего ввести между анодом и катодом лампы-диода еще один электрод.

Казалось бы, что тут великого? Было в лампе два электрода, а потом стало три.

Но какие неожиданные возможности приобрела техника с появлением трехэлектродных ламп!

Ли де Форест назвал свою лампу «аудионом». Со временем это название было забыто, и теперь лампу с тремя электродами называют триодом *.

Впоследствии появились лампы с двумя, тремя, четырьмя, пятью сетками. Но, говоря словами того же Луи де Бройля, «как бы ни были важны изменения, внесенные с течением времени в первоначальный образец триода, изобретенного Ли де Форестом, все современные типы ламп этого рода всегда основаны на следующем существенном принципе, введенном Ли де Форестом: регулировке изменения тока, который течет в вакуумной лампе между катодом и анодом, с помощью других вспомогательных электродов».

Все гениальное кажется очень простым. Лучшим тому подтверждением может служить первая сетка, сделавшая целую революцию в технике, любая область которой сейчас уже не обходится без электронных ламп.

И едва ли удастся найти сейчас электронный прибор, который обходится без триодов. Правда, вместо триода, с которым мы только что познакомились, все чаще и чаще используют полупроводниковый триод. Но, несмотря на различия в принципе их действия, все триоды (и вакуумные и полупроводниковые) решают одни и те же задачи: либо усиливают и преобразовывают сигналы, либо используются для включения и выключения тока, то есть служат простым «ключом». Точнее, ключом в этом случае является сетка, а триод подобен замку́.

Не случайно первые трехэлектродные лампы получили название пустотных реле. В электротехнике словом «реле» называют устройства, осуществляющие переключение участков цепи. До появления трехэлектродных ламп такую задачу можно было решить лишь с помощью электромагнита. Притягивая сердечник, магнит включает один контакт и разрывает другой. Триод дал возможность прерывать и включать ток без магнита и без контактов, причем время переключений сократилось в тысячи раз.

---

* Вообще все названия ламп связаны с количеством электродов: диод имеет два электрода (диа — два), триод — три, тетрод — четыре (тетра), пентод — пять (пента) и т п



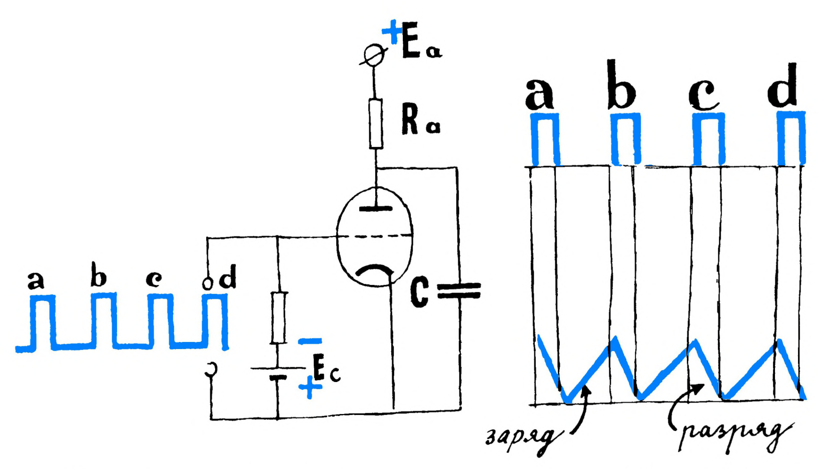
Первый триод, созданный в нашей стране под руководством М. А. Бонч-Бруевича, был призван решать именно эту задачу. Так его и окрестили: ПР-1, то есть пустотное реле типа 1.

Но самую громкую славу принесла триоду другая его способность: нет сейчас такой области электроники, где не возникала бы необходимость усиливать тот или иной сигнал.



О пиле, луче и ключе

Вот теперь, когда мы обсудили главные свойства триодов, можем вернуться к процессам, рассмотренным нами в разделе «Почти по задачнику», и составить полную схему управления электронным лучом. Если вы помните, мы уже говорили, что в схеме, где конденсатор служит «резервуаром», триод играет роль ключа *К* (см. стр 40).



Конденсатор подключен к аноду триода. Пока триод заперт, происходит заряд конденсатора; ток течет от источника E_a на землю через конденсатор C и большое сопротивление R_a .

Напряжение на конденсаторе медленно нарастает, создавая длинный скос зуба пилы. Затем на сетку приходит импульс и, создав положительный потенциал на сетке, отпирает триод. Открытый триод — все равно что широкий люк в резервуаре: через него очень быстро стекает на землю весь накопленный «резервуаром» заряд. Время разряда (T_2) соответствует короткому скосу зуба. В это время луч на экране совершает обратный ход.



Вот, собственно, и рассмотрен весь принцип прибора, позволяющего увидеть то, что невидимо. Может быть, стоит еще раз просмотреть разделы «След невидимок» и «Почти по задачнику», чтобы сложилось ясное представление о том, как осуществляется взаимодействие пилы, луча и ключа.

Осталось коснуться одного важного обстоятельства. Чтобы изображение импульса на экра-

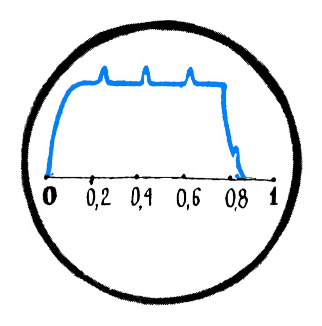
не было четким и неподвижным, необходимо, чтобы луч при каждом новом пробеге шел одним и тем же маршрутом. Лучше всего эту задачу решать по принципу «самообслуживания»: сделать так, чтобы импульс, который должен стать видимым, в нужный момент сам для себя запускал пилу. Пила запускается с помощью дополнительного триода-ключа. Импульс проходит сначала на сетку и, отперев триод, заставляет бежать по экрану луч. На экран тот же импульс придет несколько позже (для этого есть специальные схемы задержки импульса), когда луч отбежит от края экрана. Благодаря этой задержке импульс окажется в середине экрана и будет виден весь целиком.

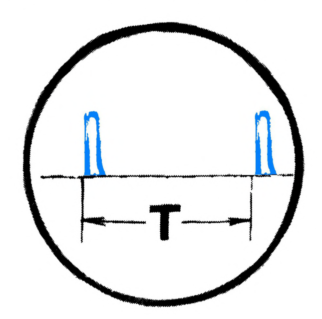
Со следующим импульсом повторится то же самое, и он тоже окажется в середине экрана. С приходом каждого импульса луч повторяет пробег по одному и тому же маршруту, обновляя свой собственный след.

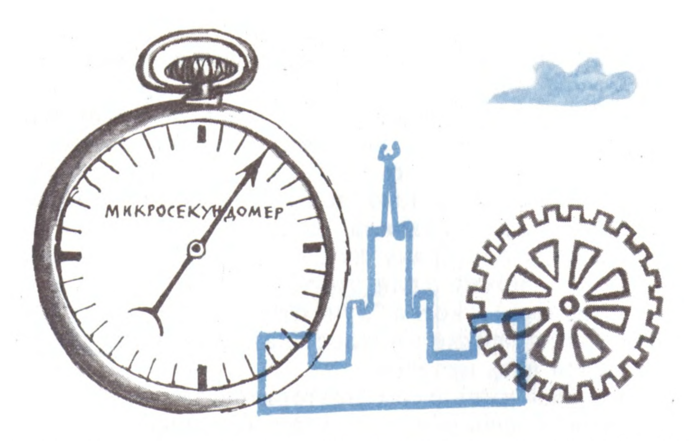
Время под микроскопом

Принцип, с которым мы познакомились, пригоден не только для наблюдения импульсов или других электронных процессов. Он еще позволяет решать задачу огромной важности: измерять время с точностью до миллионных и даже стомиллионных долей секунды. Вполне очевидно, насколько важным является это для нужд самой электроники, ведь электроны так расторопны, что почти все поручения выполняют за миллионные доли секунды.

Для измерения времени, в течение которого длится импульс, достаточно знать его ширину на экране и скорость луча. Если весь экран луч пробегает за одну миллионную долю секунды, то есть за одну микросекунду, то длительность импульса на рисунке составит 0,8 микросекунды. Для удобства отсчета можно заставить луч слегка отклоняться с по-







мощью импульсов-меток и отсчитывать по этим меткам, скажем, десятые доли микросекунд.

Можно замерять время между двумя различными импульсами. Именно так поступают в локации: по расстоянию между импульсами определяют, как далеко находится цель.

Допустим, импульс-1 попал на экран одновременно с тем импульсом, который был излучен антенной локатора. За время *T* этот импульс успел долететь до цели и, отразившись, вернуться назад. Здесь он усилился приемником и вновь отклонил электронный луч. На экране возник новый импульс (назовем его импульсом-2).

Импульс летит со скоростью света, то есть 300 000 километров в секунду. Расстояние 150 метров туда, до цели, и 150 метров обратно он пройдет за одну миллионную долю секунды, то есть как раз за то время, в течение которого луч пересек экран. Значит, между временем *T* на экране (при известной скорости пробега луча) и расстоянием до отражающей цели существует вполне определенная связь. Чтобы определить расстояние с точностью до 10 метров, надо измерить время с точностью до десятых долей микросекунды. Такую задачу можно решить только с помощью электронных приборов, позволяющих растянуть на экране миллионные доли секунды, подобно тому как микроскопы «растягивают» микроскопические объекты, увеличивая их в несколько тысяч раз.

Представьте себе, что кто-то решил измерять миллионные доли секунды, не прибегая к помощи электроники. Можно ли сделать это с помощью секундомера?

Стрелка его совершает один оборот в секунду. Если в одном миллиметре циферблата секундомера содержится миллионная доля секунды, то длина окружности циферблата

должна составлять миллион миллиметров, или один километр, а диаметр — около 300 метров: циферблат оказался выше здания МГУ!

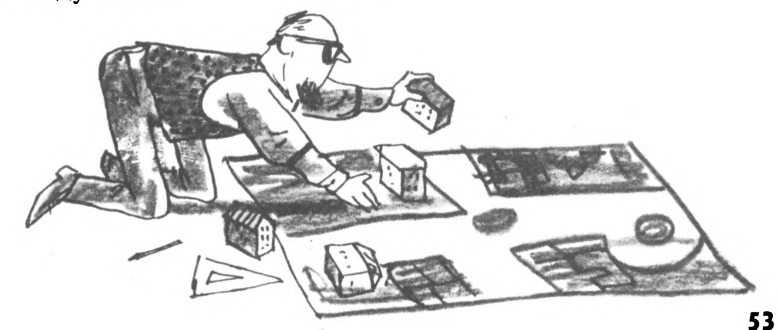
А может быть, надо заставить стрелку совершать один оборот в микросекунду? Тогда за секунду она должна совершить миллион оборотов. Если вращать такое устройство мотором, совершающим 100 оборотов в секунду, то придется ставить редуктор. Попробуем стрелку «микросекундомера» укрепить на колесике с диаметром в один сантиметр. Тогда на входе редуктора придется поставить стометровое колесо. Сколько же надо затратить энергии, чтобы вращать со скоростью 100 оборотов в секунду стометровое колесо?!

Результат получается парадоксальный: ничтожно маленькая микросекунда требует фантастически громадных часов. А удивляться здесь, собственно, нечему. Механика слишком тяжеловесна для измерения миллионных долей секунды. Тут нужны иной «механизм» и иные «детали» — подвижные, легкие, в общем такие, как электрон.

Фундамент огромного здания

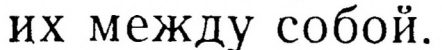
Глава подходит к концу. Того, что было рассказано, разумеется, слишком мало, чтобы судить обо всей электронике, но уже достаточно, чтобы найти к электронике определенный подход.

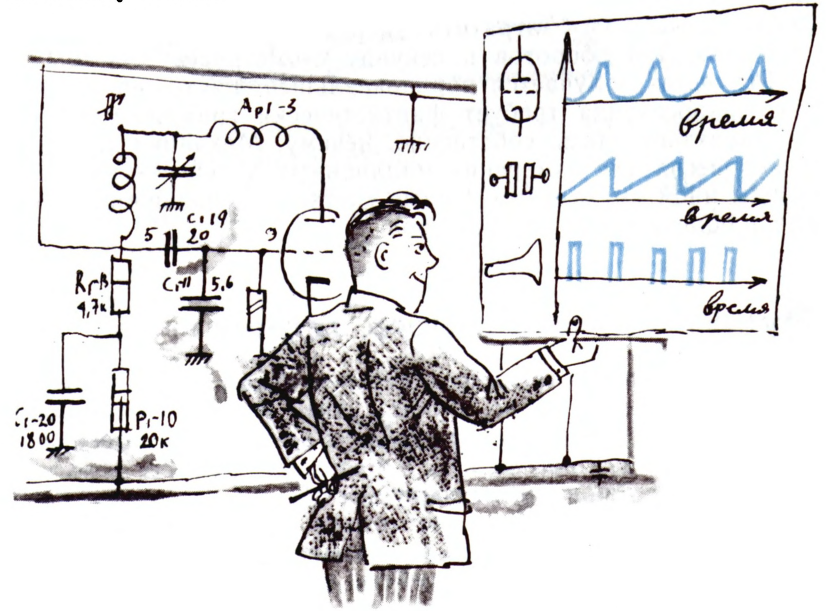
Есть две стороны электроники, и обе они одинаково необходимы тому, кто решил в ней что-то познать. С одной стороны — основные понятия и законы, детали конструкции электронных приборов и элементы схем. С другой — совокупность многих процессов, одновременно текущих во времени, их сложная взаимосвязь. Нельзя понять эти процессы, не зная законов или деталей конструкций. И в то же время, даже зная все элементы, иногда бывает не просто увязать их между собой.



С одним из таких процессов читатель уже столкнулся. Это процесс, в котором невидимый электрический импульс прорисовывается на экране трубки электронным лучом. Здесь изменяется одновременно ток в лампе, ток в конденсаторе, напряжение на пластинах и путь электронов, образующих луч.

Подобных процессов в электронике много. И чтобы понять, как они протекают в схемах, нужно учитывать множество одновременно текущих событий и явлений и увязывать их между собой.





Создавая проект нового здания, архитектор мысленно видит его в пространстве. Специалисты по электронике при создании любого прибора должны четко мыслить во времени.

Этим искусством они овладели. Лучшим тому подтверждением служат тысячи тысяч электронных приборов, созданных техникой за последние 30 лет. Во многих из этих приборов используются лампы и электронные трубки. В разных приборах они выполняют разные функции.

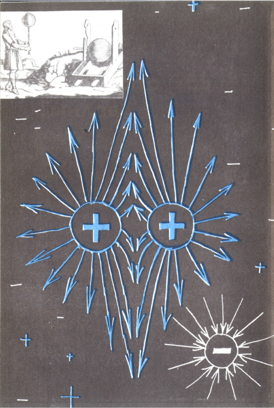
Но как ни разнообразны задачи электронных приборов, как ни извилисты пути их решения, всюду в них используются уже известные нам принципы: управление током в лампе и управление в трубке электронным лучом.

Без этих принципов электроника не может ступить ни шагу, они — ее основной фундамент, ее гордость, ее капитал.

ГЛАВА II

как открывали волны?

Здесь читатель
сможет сам
убедиться в том,
что для электроники
поле не менее
важно, чем электрон.
Он познакомится
с волнами, которые
были открыты
раньше, чем их
удалось обнаружить,
и узнает, каким
образом радио
обходилось
без электроники
и на что оно
было способно.

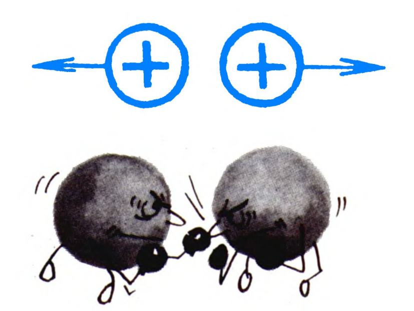


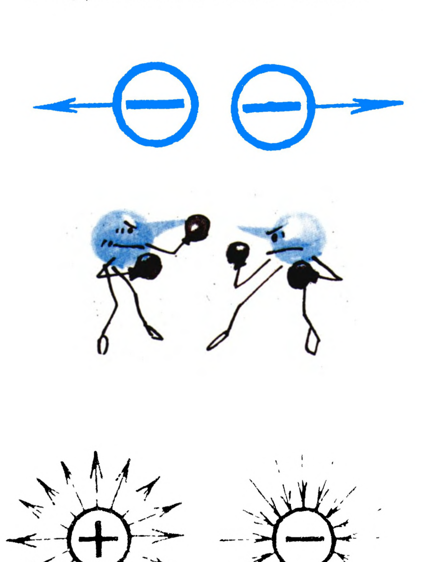


ВОКРУГ ЗАРЯДОВ НЕТ ПУСТОТЫ!

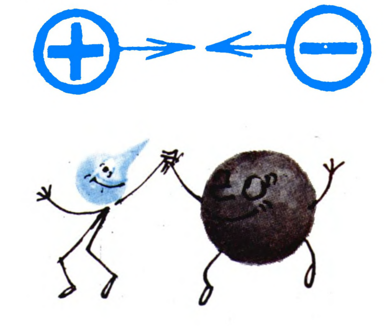
II.1

Электрические заряды окружены электрическими силовыми полями. Взаимное притяжение зарядов, имеющих разные знаки, или отталкивание одноименных зарядов обусловлено взаимодействием этих полей.



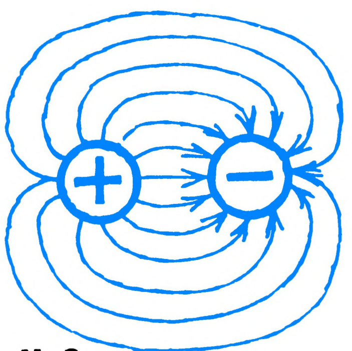


Силы, действующие в пространстве вокруг заряда, условно изображаются стрелками. Установлено (тоже условно), что стрелки выходят из тела, заряженного положительно, и входят в тело, имеющее отрицательный заряд.



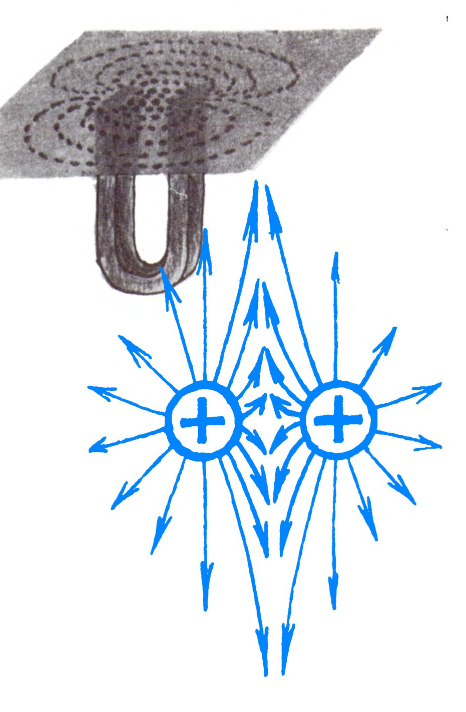
II.2

Так выглядит электрическое поле разноименных зарядов. А рядом поле вокруг полюсов магнита. Нетрудно заметить сходство электрических и магнитных полей.



II.3

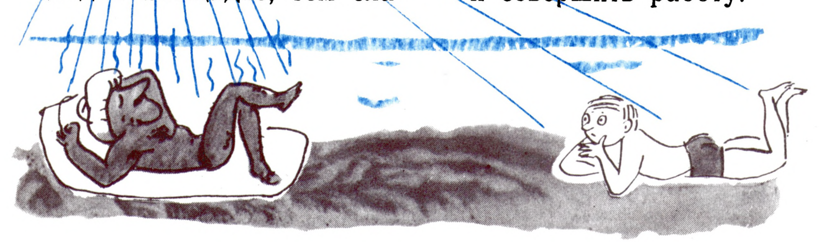
Так расположены силовые линии электрического поля в случае столкновения двух зарядов, имеющих одинаковый знак. Силовые линии как бы противятся сближению этих зарядов наподобие упругих пружин.



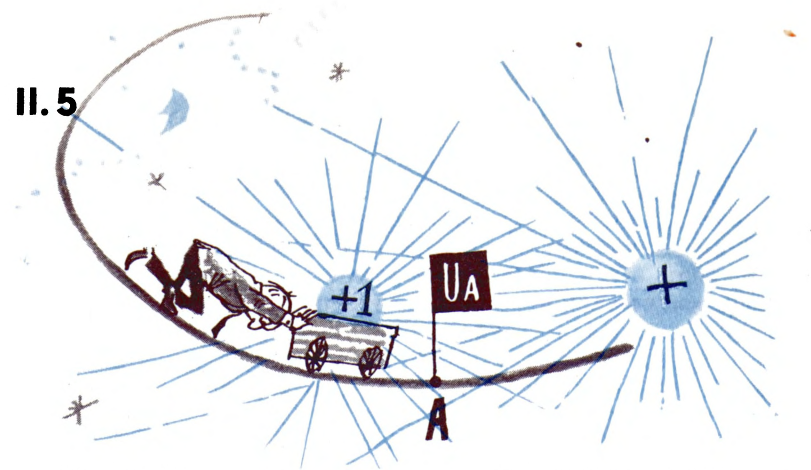
II.4

Заряд подобен солнцу, а силовые линии — лучам. Чем дальше от солнца, тем меньше лучей достается каждой площадке, тем слабее взаимодействуют заряженное электричеством тело и точечный заряд.

Чтобы преодолеть противодействие поля при сближении одноименных зарядов, надо затратить энергию и совершить работу.



II.5



Попытайтесь представить себе бесконечность. Трудно, не правда ли?

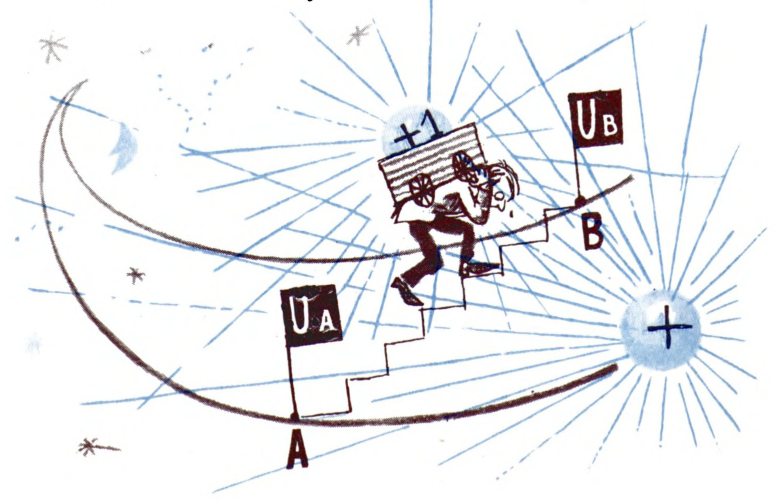
А теперь вообразите, что некто, взяв с собой единичный заряд, прошел с ним путь из бесконечности до точки *A*, находящейся в поле исходного заряда.

Та работа, которую пришлось совершить нашему некто, чтобы переместить единичный заряд из бесконечности в точку *A* поля нашего заряда, и определяет *потенциал* точки *A* (обозначается через U_A).

II.6

Путешествие из бесконечности в точку *B* потребует другой затраты энергии, поэтому потенциал U_B отличается от потенциала U_A.

Бесконечность — понятие не очень-то ощутимое. Зато теперь, когда путь из бесконечности в точки *A* и *B* нами успешно пройден, все становится гораздо нагляднее: работа, которую надо затратить, чтобы переместить единичный заряд из точки *A* в точку *B*, равна разности потенциалов U_A и U_B, то есть $(U_A - U_B)$.



Нити тянутся в прошлое

В неразрывной связи теории с практикой растет величественное здание электроники, а фундаментом этого громадного здания служит незримый маленький электрон.

Но если бы в фундаменте были только одни электроны, никакого «громадного здания» никто бы построить не смог. Прежде чем создавать электронику, людям нужно было собрать «по кирпичику» множество сведений о зарядах, об их движении, взаимодействии с полем, о свойствах полей электрических и магнитных, о законах индукции, о постоянных и переменных токах, об электродвижущей силе, о том, как воздействует ток на магнитную стрелку и как будет вести себя провод с током, если к нему поднести магнит.

А потом могучий разум Максвелла, впитав в себя все эти сведения, по крупице добытые в сотнях лабораторий, уловил неразрывную связь электричества и магнетизма, отразил ее в стройной системе своих уравнений и предрек открытие электромагнитных волн.

После смерти Максвелла эти волны были получены Герцем.

Попов использовал их для беспроволочной связи.

А дальнейшее развитие радиосвязи привело к созданию диодов, триодов и других электронных приборов и ламп.

Такова предыстория электроники. А с чего началась сама электроника? Быть может, с открытия электрона? Нет, открытие Гельмгольца не послужило началом развития электроники: ведь электронами в то время никто не умел *управлять*. Управлять ими помогла электронная трубка. Но и она не создала электроники: пока не появились на свет электронные лампы, трубка вела тихую жизнь затворницы в стенах храма чистой науки, и, кроме узкого круга физиков, с ней никто не был знаком.

Может быть, рождение электроники надо связать с изобретением трехэлектродных ламп? Но для чего Ли де Форест ввел свою сетку? Оказывается, чтобы управлять электронами с помощью поля. Значит, прежде чем создавать триоды, надо было исследовать свойства полей.

А зачем понадобились триоды? Чтобы усовершенствовать радиосвязь. Передатчик Попова был мало похож на современный: он мог передавать только азбуку Морзе в виде коротких всплесков радиоволн. О передаче речи, музыки, изображения не могло быть и речи. Все эти возможности появились после того, как появился триод.



Итак, триод позволил усовершенствовать принцип, открытый Поповым. Попов использовал волны, полученные Генрихом Герцем. Герц подтвердил гениальную мысль Максвелла. Максвелл обобщил факты, добытые Фарадеем.

А Фарадей...

Опять потянулась ниточка в прошлое. Где же ее начало? Оно теряется в древних веках.

Янтарная палочка

С электричеством люди знакомы давно. Оно испокон веков являлось им в грозном обличии грома и молнии. Не зная природы грозы, наши предки считали ее проявлением гнева богов. Даже самым смелым из мыслителей древности не приходила в голову дерзкая мысль обуздать эту силу и обратить ее на пользу людей.

Второе электрическое явление, с которым столкнулись люди, имело характер столь безобидный, что трудно было



усмотреть в нем что-либо общее с проявлением грозных стихий.

Янтарная палочка, натертая шерстью, притягивала к себе легкие предметы: пушинки, кусочки бумаги. По свидетельству древнегреческого философа Фалеса Милетского, жившего в VI веке до нашей эры, явление это было открыто ткачихами, обрабатывавшими шерсть. Возможно, оно было известно людям и раньше, но мы впервые встречаем точное описание подобных фактов, природа которых была в то время никому не ясна, в трудах мудреца из Милета.

И вплоть до конца XVIII столетия не было сделано ни единой попытки глубже исследовать эти явления и уяснить их суть. Зато в XIX веке электричество стало основой прогресса, неотъемлемой частью всех технических достижений и научных теорий, объясняющих, как устроен наш мир. Никого не удивлял больше тот факт, что одними и теми же силами рождаются, казалось бы, совсем несходные друг с другом явления: взаимодействие частиц внутри атома и движение мощных электромоторов, удар молнии и притяжение шерстяных нитей палочкой из янтаря.

Электричество стали обнаруживать всюду. Но не потому, что оно вошло в моду, а потому, что большинство происходящих в нашем мире явлений и в самом деле управляется магнитными и электрическими силами.

Кроме них, науке известны лишь сила инерции, силы всемирного тяготения (так называемые гравитационные силы) и силы, действующие внутри атомного ядра.

Ядерные силы имеют малый радиус действия — их влияние не распространяется за пределы ядра. Гравитационные силы на атом действуют слабо — он слишком легок для того, чтобы ощущать тяготение Земли. И лишь электромагнитные силы успешно участвуют во взаимодействиях атомов и молекул. От этих сил зависит строение молекул и атомов, их взаимное влияние, ход всех химических превращений, структура кристаллов, свойства различных физических тел.

Век электричества — это не только мощные моторы и генераторы или тончайшие измерительные приборы, но еще и новое мировоззрение, новый взгляд на природу многих явлений, обусловленных взаимодействием электромагнитных полей.

А началось все с янтарной палочки. Даже само название — электричество — произошло от янтарной палочки: «янтарь» по-гречески — «электрон».

Чувствуете, насколько узким казалось вначале понятие

«электричество»? Нечто вроде «силы, таящейся в янтаре». Зато потом эти рамки так расширились, что в них уместился весь мир. Ведь он состоит из атомов и молекул, а они как единое целое существуют благодаря взаимодействию электромагнитных сил.



Таков вкратце путь науки об электричестве: в начале — янтарная палочка, в конце — огромный, неисчерпаемый мир. Хорошо сказал по этому поводу французский поэт Поль Валери: «Что может быть более непонятного для ума, чем история небольшого кусочка янтаря, столь покорно проявляющего силу, которая скрыта во всей природе, которая, быть может, и есть вся природа и которая в течение всех веков, кроме последнего, проявлялась лишь в нем?»

Первый закон

Что же все-таки происходит с янтарной палочкой, когда ее натирают шерстью? Только в конце XVIII столетия наука дала более или менее четкий ответ: палочка заряжается электричеством. А что такое электричество? Откуда оно взялось?

В XVIII веке ответов на эти вопросы наука дать не могла. Она ограничивалась констатацией фактов.

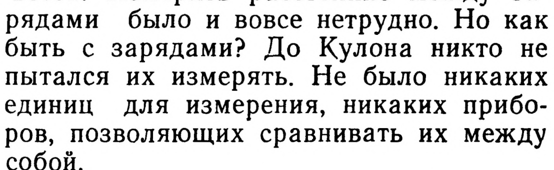
В 1734 году ученый из Франции Дюфе установил, что существуют заряды двух видов. Один вид возникал все в той же янтарной палочке при натирании ее шерстью. А поскольку янтарь есть не что иное, как окаменевшая смола деревьев, Дюфе назвал этот вид зарядов смоляным электричеством. Другой вид зарядов, появлявшихся на натертой кожей стеклянной палочке, он назвал стеклянным электричеством.

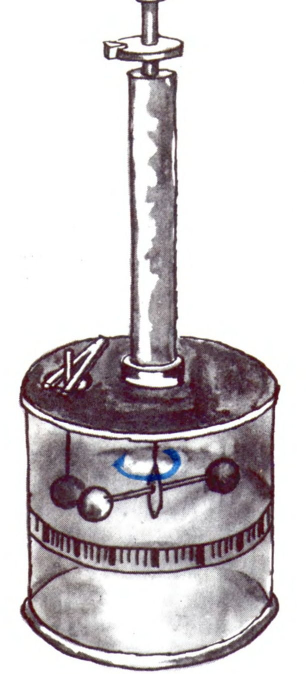
Впоследствии, чтобы различать эти заряды, их стали условно обозначать дошедшими до наших дней знаками «минус» и «плюс».

Было установлено, что тела, имеющие заряды с одинаковым знаком, взаимно отталкиваются, а заряженные разноименно — стремятся друг к другу (см. II.1).

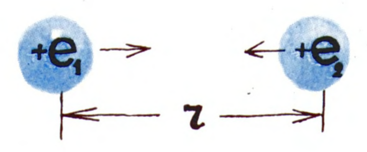
В 1775 году Кулон поставил первый количественный эксперимент. Он задался целью определить, от чего зависят силы взаимного притяжения двух точечных зарядов (Кулон называл эти силы электрическими флюидами) и какова величина этих сил. А что такое точечный заряд? Уж не имел ли Кулон в виду электрон?

Нет, Кулон не имел ни малейшего представления об электроне. Точечным он называл любое заряженное тело, размеры которого были во много раз меньше, чем расстояние до других заряженных тел. Надо было определить, как зависит от расстояния сила взаимного притяжения заряженных точечных тел. При этом необходимо было учесть и величину полученного каждым телом заряда: ведь сила тем больше, чем больше каждый заряд. Измерять силу в то время умели достаточно точно. В частности, Кулон измерял силу взаимодействия двух зарядов с помощью специально сконструированных крутильных весов. Измерить расстояние между зарядами было и вовсе нетрудно. Но как быть с зарядами? До Кулона никто не пытался их измерять. Не было никаких единиц для измерения, никаких приборов, позволяющих сравнивать их между собой.





Кулон поступил весьма остроумно. Он взял два заряженных шарика и определил, с какой силой они притягиваются друг к другу. Затем взял третий, незаряженный, и заставил его соприкоснуться с заряженным. Заряженный шарик в миг прикосновения передал ему ровно поло-



$$F = k\frac{e_1 e_2}{r^2}$$

вину заряда, так как оба шарика были сделаны из одинакового материала и имели один и тот же размер. После этого сила уменьшилась вдвое. Затем Кулон стал увеличивать расстояние между заряженными шариками в 2, 3, 4 и 5 раз. Сила начала уменьшаться соответственно в 4, 9, 16 и 25 раз.

Так был найден закон взаимодействия двух точечных зарядов: *сила взаимодействия пропорциональна величинам обоих зарядов и обратно пропорциональна расстоянию, возведенному в квадрат.*

В честь этого эксперимента закон был назван законом Кулона. И единицы, которыми впоследствии стали измеряться заряды, тоже называют кулонами. По сравнению с зарядом одного электрона кулон выглядит сущим гигантом: тело должно получить 6 290 000 000 000 000 000 электронов, чтобы приобрести заряд в один кулон. Число огромное. Если в течение каждой секунды передавать телу один миллион электронов, то заряд в один кулон накопится лишь через 200 лет.

Чем заполнена пустота?

Так постепенно рождалась наука. Сначала был известен лишь факт притяжения разноименных зарядов, затем был найден строгий количественный закон. Появилась первая формула, которой подчиняется узаконенное поведение двух заряженных тел. По этой формуле можно определить силу, с которой притягиваются заряды, имеющие разные знаки. Но почему они стремятся друг к другу? Каким образом одно тело действует на другое, хотя между ними, кроме пустого пространства, нет ничего?

Выходит, что тело, обладающее зарядом, каким-то образом чувствует на расстоянии присутствие другого заряда? Его «влечет неведомая сила» к зарядам, имеющим противоположные знаки!

Примерно так объясняла эти явления теория дальнодействия, существовавшая в те времена. Но что это за объяснение? Можно подумать, что речь идет о переживании двух влюбленных, а не о взаимодействии физических тел!

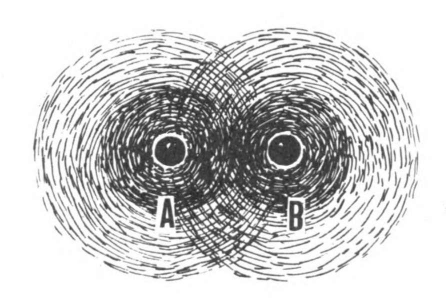
И тем не менее ничего более вразумительного наука в то время предложить не могла. Электричество было ей еще слишком мало знакомо. То ли дело механика! Тут все наглядно: тела воздействуют друг на друга посредством удара, давления, тяги. Сила проявит себя не раньше, чем соприкоснутся тела. А впрочем... Разве всякое механическое тело не

чувствует на расстоянии притягательной силы Земли? На все тела Земля действует на расстоянии без штоков, без тяг, без рычагов. Почему?

На предмет, обладающий массой, действует сила тяжести. Заряд, находящийся поблизости от другого заряда, тоже подвержен действию сил. А нельзя ли эти силы представить себе наглядно?

Оказывается, можно. Именно это и сделал впервые Фарадей. Заряженное электричеством тело он окружил стрелками, показывающими направление действия сил (см. II.1).

Каждый заряд имеет определенную «сферу влияния». От него в пространство тянутся силы, словно от солнца лучи (см. II.5).



Так вот в чем секрет воздействия через пространство! Пространство вокруг зарядов перестает быть пустым! Вокруг него образуется *поле* — поле действия сил. Никакого дальнодействия нет — силы действуют здесь в непосредственной близости. В каждой точке пространства имеется поле, которое действует на внесенный в него заряд.

Это была гениальная догадка. Даже сам Фарадей не мог предугадать, какие последствия повлечет за собой эта глубокая и далеко идущая мысль.



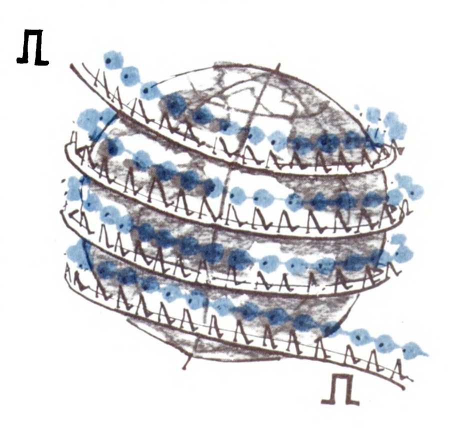
ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

II. 7

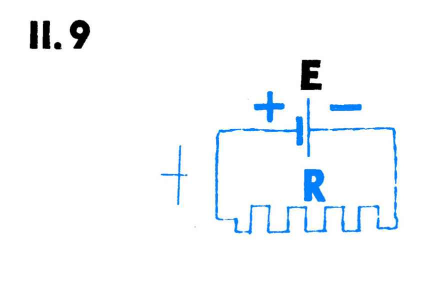
Заряд и масса одного электрона настолько ничтожны, что работу, совершенную электроном, никто бы заметить не смог. Но электрон никогда не работает в одиночестве. Стоит к куску провода подключить источник, и все электроны мгновенно приходят в движение, каким бы длинным ни был наш проводник.

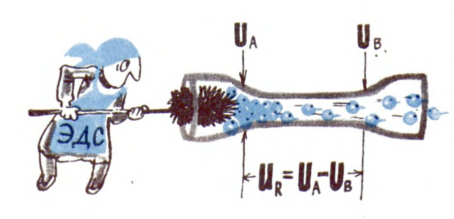
II. 8

Даже в том случае, если длина проводника составляет 300 000 километров, и он может опоясать экватор семь с половиной раз, понадобится только одна секунда, чтобы импульс тока, возникший в начале этого провода, успел дойти до его конца. Это, конечно, не значит, что электроны успели пройти за секунду весь путь длиной в 300 000 километров. Просто они приходят в движение *практически одновременно,* словно выстроенные в колонну солдаты, шагнувшие после команды «марш!».



II.9





Электрическая цепь состоит из трех основных элементов: источника напряжения *(E)*, нагрузки *(R)* и соединительных проводов. Внешняя цепь (провода и нагрузка) имеет определенное сопротивление. Благодаря той энергии, которой обладает источник, он может «проталкивать» электроны через это сопротивление. Способность источника «проталкивать» по внешней цепи электричество называют его *электродвижущей силой E*, сокращенно *эдс.*

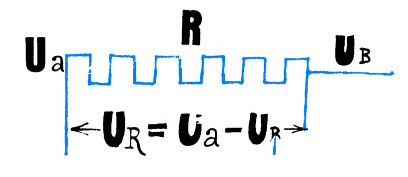
II.10

Ток, текущий по внешней цепи, создает в ней *падение напряжения* ($U_{цепи}$).

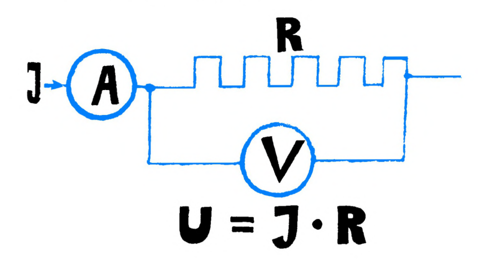
Падение напряжения всей цепи всегда равно электродвижущей силе источника, то есть $E = U_{цепи}$).



II.11



Провода обладают обычно малым сопротивлением. В основном напряжение падает на нагрузке *R*. Проходящие здесь электроны создают на концах сопротивления разность потенциалов $U_A - U_B$. Эта разность потенциалов и равна *паде-*



нию напряжения, то есть $U_R = U_A - U_B$.

Сила тока в нагрузке J и падение напряжения (U_R) связаны известным законом Ома:

$$J = \frac{U_R}{R}$$

Сила тока зависит от того, какое количество электронов в секунду пройдет через сопротивление R.

При токе, равном 10 миллиамперам (то есть 10 тысячным долям ампера), через поперечное сечение провода пробежит за секунду «толпа» электронов численностью около 63 квадрильонов штук ($63 \cdot 10^{15}$). Примерно такое количество электронов проходит в течение каждой секунды через триоды или диоды. А в нити осветительной лампы, где ток достигает долей ампера, «толпа» электронов больше еще раз в пятьдесят.

II.12

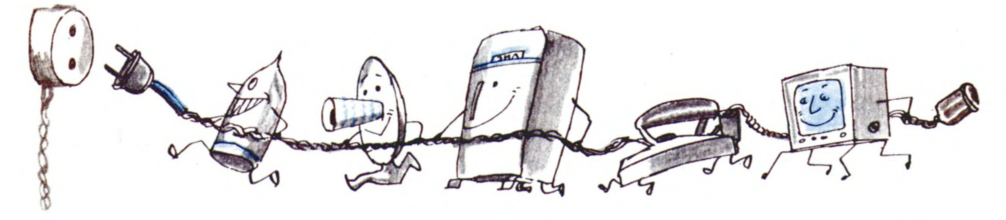
Пройдя через сопротивление, электрон теряет энергию, и она выделяется в виде тепла. От одного электрона тепла выделится настолько мало, что заметить его нельзя. А «коллектив» электронов может нагреть сопротивление до очень высокой температуры. Существует целый ряд известных всем *потребителей электроэнергии,* в которых энергия движущихся электронов выделяется в виде тепла.

Любой из потребителей обладает каким-то сопротивлением, на котором падает определенное напряжение:

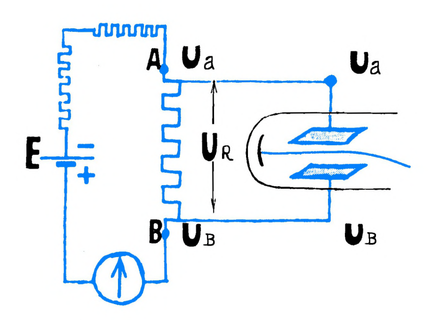
$$U_R = U_A - U_B.$$

Мы уже знаем, что энергия зависит от разности потенциалов (см. II.6). Кроме того, согласно закону Ома «коллектив» электронов, проходящих через сопротивление R, будет тем больше, чем больше U_R (см. II.11). Итак, с ростом U_R увеличивается затрата энергии каждого электрона и растет число электронов. Поэтому мощность P, выделенная в нагрузке, растет как квадрат U:

$$P = \frac{U_R^2}{R}.$$

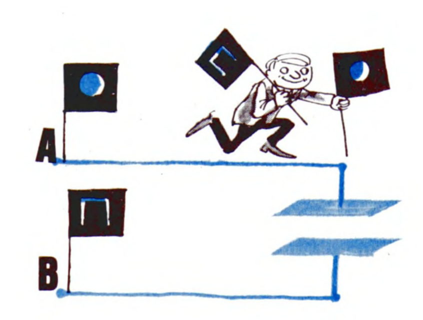


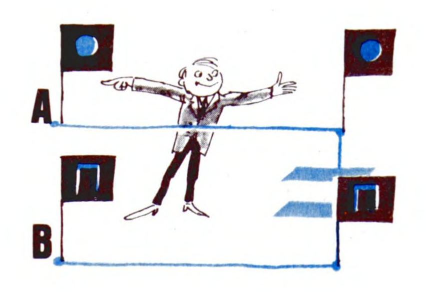
II.13



Если подключить к концам *A* и *B* сопротивления *R*, по которому течет ток, управляющие пластины трубки, то потенциал одной из пластин станет равным U_A, а второй — U_B (при условии, что сопротивление соединительных проводов настолько ничтожно, что им можно пренебречь).

В этом случае говорят, что напряжение $U_R = U_A - U_B$ «снято» с сопротивления *R* и «подано» на пластины. Напряжение, поданное на вход электронной лампы (между катодом и сеткой) и снятое с ее анодного сопротивления, будет усилено в несколько раз (см. I.34).

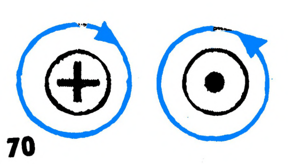


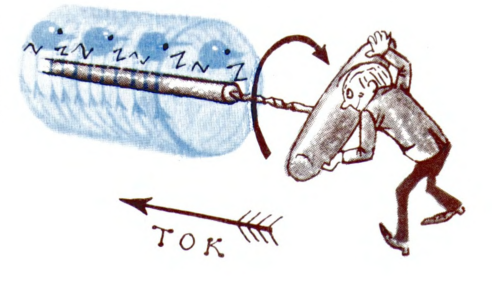


II.14

Помимо тепла, бегущие по проводу электроны рождают другой вид энергии — энергию поля.

Провод с током всегда окружен силовыми линиями магнитного поля. Направление линий совпадает с вращением головки буравчика, если сам буравчик ввинчи-

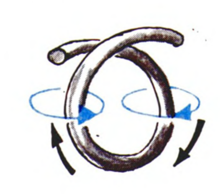


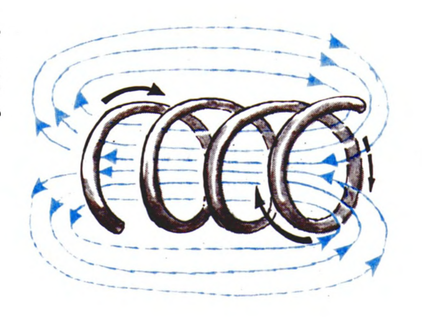


вается туда, куда движется ток. (Кстати, заметим, что во всех правилах, по которым определяется взаимодействие тока и магнитного поля, фигурирует *технический ток*. Он течет навстречу движению электронов. Подобная «путаница» имеет исторические причины: правила эти возникли раньше, чем был открыт электрон.)

II.15

В проводе, свитом в виде спирали, магнитные линии тоже работают «коллективно» — их усилия складываются в общий поток, направленный вдоль оси. Получился так называемый *соленоид*. Если пустить сильный ток по виткам соленоида и вставить внутрь него сердечник с хорошими магнитными свойствами, он превратится в мощный электромагнит.

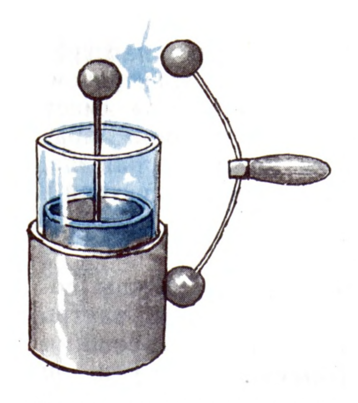




Молния в банке

При Фарадее наука об электричестве развивалась бурными темпами. Любое открытие находило себе применение и служило пищей для новых поисков и идей.

Кулон исследовал свойства зарядов раньше на несколько десятилетий. Никто не знал в то время, что делать с зарядами: ведь не было даже источников тока, и никто не представлял себе, что эти заряды можно транспортировать по проводам. Но тогда хорошо знали механику. Потому и решили, что лучше всего для начала призвать на помощь ее. Вместо того чтобы тереть руками янтарную палочку, решили сделать специальное колесо. Саму палочку заменили боль-



шим стеклянным стаканом, который внутри и снаружи обложили слоем свинца. Так в лабораториях голландского города Лейдена возникли первые конденсаторы, известные под названием лейденских банок. Предполагалось, что эта машина начнет вырабатывать невидимую «электрическую жидкость», а лейденская банка будет наполняться ею до краев.

Механика не подкачала. Если трущийся о волосы гребень способен создать искры электрического разряда, едва заметные в темноте, то с помощью колеса удавалось получать в лейденской банке большие заряды. Эти опыты стали настолько модными, что их проводили не только в лабораториях, но и в гостиных аристократов и во дворцах королей.

Людовик XV выстраивал в цепь солдат и забавлялся, наблюдая гримасы, когда ток разряда лейденской банки проходил по этой живой цепи. На глазах изумленной публики извлекали из банок искры, подобные молниям. Аристократия изумлялась: «Экое чудо — молния в банке! На что только не способна наука!» Но дальше этого дело не шло.

То ли дело при Фарадее! К электрическим и магнитным явлениям устремлена передовая научная мысль. Ампер и Деви, Вольта и Ом, Эрстед и Гельмгольц с разных сторон подходят к одним и тем же проблемам. Идеи витают в воздухе, как электричество перед грозой. Это уже не наука ради науки, не любознательность одиночек — практика настоятельно ставит цели науке, требует от нее разрешения все новых и новых проблем.



А если, решая эти задачи, наука наталкивается на неизвестное? Что ж, тем лучше! Значит, будет новая почва для новых практических дел.

Так электролиз, созданный для выделения чистых металлов и газов, помог открыть электрон. Те же химические процессы легли в основу первых источников тока, появившихся в результате открытий Гальвани и Вольты, которые так и вошли в обиход под названием гальванических источников тока или вольтовых батарей.

С появлением этих источников интерес к электричеству чрезвычайно возрос. Научились передавать заряды по проводу, и притом сразу заметили, что ток, текущий по проводу, выделяет тепло. А тепло можно заставить делать работу — эта мысль была хорошо усвоена, она породила целую революцию в технике, которой славен минувший век.

Сходство или родство?

Фарадей не имел ни малейшего представления об электронике. Кулон — и подавно. И вместе с тем они сыграли в ее развитии чуть ли не самую главную роль. Кулон изучал заряд. Фарадей ввел в науку понятие поля. А чем занимается электроника?

Многим. И спутниками, и телевидением, и вычислительными машинами, и мало ли еще чем! Но если присмотреться внимательно, то все это многообразие можно свести к различным случаям взаимодействия изученных Кулоном зарядов и открытых Фарадеем полей.

Правда, помимо полей Фарадея, электронике приходится исследовать и другие поля.





Фарадей изучал поля, образованные неподвижным зарядом. Они подобны застывшим песчаным дюнам при полном отсутствии ветерка.

В электронных приборах заряды чрезвычайно подвижны. Электроны, излучаемые катодом, непрерывным потоком бегут на анод. С анода по проводу и другим элементам, к другим приборам, к другим проводам. И поле бежит следом за электронами неотступно, как тень. Это уже не застывшее поле. Оно меняется с изменением тока. Пространство вокруг проводов с переменным током уже не похоже на застывшие дюны, оно подобно бурному морю с непрерывным движением волн. Это электромагнитные волны.

Электромагнитное поле. Электромагнитные волны. В этих понятиях слились воедино два различных, но неразрывно связанных природой явления — электричество и магнетизм.

Связь удалось обнаружить не сразу. Сначала было замечено сходство. Янтарная палочка притягивает кусочки шелка. Магнит притягивает железную стружку. Заряд окружен электрическим полем. Магнитное поле окружает магнит. Поле — не фантазия Фарадея. Если вы захотите увидеть магнитное поле, насыпьте на листочек бумаги железных опилок и поднесите снизу магнит, и сразу возникнут те самые силовые линии, которые изображал на рисунках сам Майкл Фарадей (см. II.2).

Были замечены и различия: заряд положительный и заряд отрицательный могут существовать независимо друг от друга. А полюса магнита отделить друг от друга нельзя. Можно разломать магнит на две части, и все равно в каждом кусочке будет северный полюс и южный. Магнит похож на сказочного дракона — отруби ему голову, вырастет новая голова *.

---

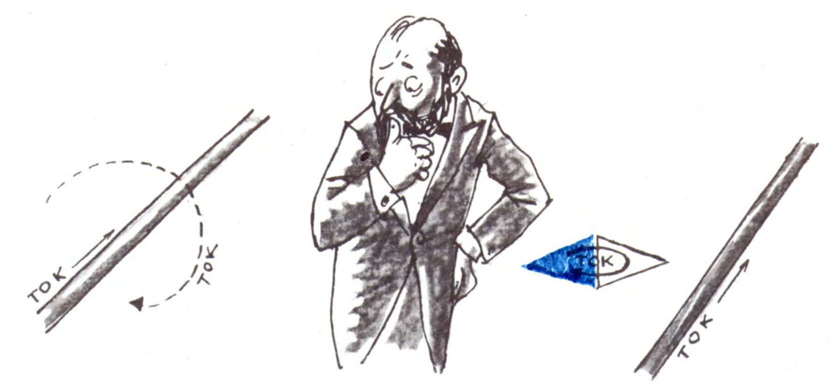
* Заметим попутно, что впоследствии была открыта способность некоторых веществ сохранять неподвижные электрические заряды за счет определенной ориентации молекул или ионов. Такие тела называются *электретами.* Разломив пополам стержень из электрета, получим в каждом куске два полюса — «минус» и «плюс».

Так и жили в науке два явления, в чем-то очень похожие, а в чем-то отличные друг от друга. Электричество и магнетизм. Они исследовались порознь, независимо друг от друга до тех пор, пока между ними не была обнаружена связь. Первым доказал единство этих явлений датский ученый Эрстед. В 1819 году он поместил магнитную стрелку рядом с проводом, подключил провод к вольтовой батарее и пустил по нему ток. И стрелка начала отклоняться. Значит, магнитное поле существует не только вокруг магнита. *Электрический* ток, оказывается, тоже способен создать *магнитное* поле. Тут было над чем задуматься. Было два разных явления, а вдруг обнаружилось, что между ними есть неразрывная связь.

Вслед за Эрстедом

Весть об опытах, произведенных Эрстедом, за короткий срок облетела мир. Провод с током в то время притягивал не только магнитную стрелку — мысль ученых во всех странах вновь и вновь устремлялась к этому проводу. И не случайно: все понимали, что мир стоит на пороге новых открытий, хотя до конца даже сущность первого и, казалось бы, очень несложного опыта еще никто не мог объяснить.

Что же все-таки заставляет стрелку отклоняться от провода? Сам Эрстед полагал, что она вращается электричеством, которое якобы перемещается не только внутри, но и вокруг проводов. Ампер выдвигает другую гипотезу. Он считает, что ток течет внутри намагниченной стрелки и взаимодействуют тут два тока: ток, текущий по проводу, и ток самой стрелки.



Кто из них прав? Может быть, ошибаются оба? Нужны были новые эксперименты, чтобы подтвердить или опровергнуть гипотезы, объяснить все до конца.

В Париже, в Лондоне, в Петербурге, во Флоренции, в Мюнхене, в Гейдельберге, в Женеве без конца повторяется опыт Эрстеда: рядом со стрелкой располагается провод, а затем включается ток. И всякий раз стрелка ведет себя неизменно — лишь только ток появляется в проводе, она мгновенно встает поперек.

Великий Ампер, вдохновленный идеей Эрстеда, запирается в лаборатории, чтобы исследовать, как воздействуют друг на друга заряды, если они не пребывают в покое, а перемещаются по проводам. Кстати, это совсем не в духе Ампера. До сих пор он все открывал на бумаге, а исследовательской лаборатории всегда предпочитал кабинет. Но тут уж без опыта не обойдешься, любую мысль надо тщательно проверять.

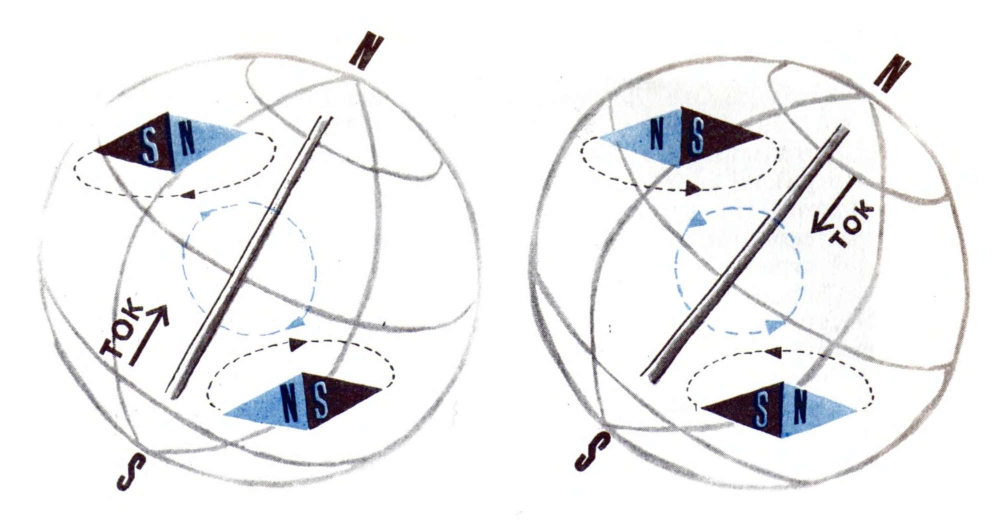
В семи докладах, с блеском прочитанных Андре Ампером на заседаниях Французской академии, нашли отражение все результаты его трудов. Семь докладов Ампера — словно семь столбов на границе двух областей. По одну сторону рубежа — все, что касается неподвижных зарядов, по другую — заряды в движении и те явления, которые рождает электрический ток.

Первая область получила название электростатики (статика — неподвижность). Свойствами неподвижных зарядов интересовался еще Кулон. Вторая область — электродинамика, наука о действии движущихся зарядов, фундамент которой заложил своими трудами Ампер. Попутно он сделал и ряд блестящих открытий, в числе которых знаменитый соленоид Ампера, на базе которого американский ученый Генри вскоре создал электромагниты, поднимавшие тяжести весом до двух тонн (см. II. 15).

Куда повернется стрелка?

В Париже блистательный Ампер закладывает фундамент новой науки. А в это время Майкл Фарадей, молодой скромный служащий Королевского института в Лондоне, недавно расставшийся с профессией переплетчика, вслед за Эрстедом тоже помещает провод рядом с магнитной стрелкой и пускает по проводу ток.

Удивительным качеством наградила Фарадея природа: он

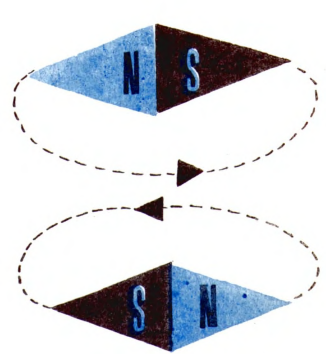


стремится все пощупать своими руками, никаким выводам он не хочет верить до тех пор, пока все не проделает сам.

Да, стрелка действительно поворачивается под действием тока. Но что заставляет ее повернуться? Ток, текущий в пространстве вокруг проводов? Или ток, окружающий стрелку? Нет, это еще надо проверить.

Если ток течет с юга на север — северный полюс магнитной стрелки, расположенной под проводом с током, поворачивается на запад *. А если поместить стрелку над проводом? Тот же полюс будет смотреть на восток. Почему? А если изменить направление тока? Все получится наоборот. Стрелка под проводом повернется на восток. Стрелка над проводом будет смотреть на запад. Чем это все обусловлено?

У Фарадея рождается подозрение: может быть, ток создает магнитное поле? Допустим, что вокруг провода возникают магнитные силы в виде окружающих провод колец (см. II.14). Как будут действовать эти кольца на стрелку?



Две намагниченные стрелки притягиваются разноименными полюсами друг к другу. При этом их силовые линии направлены встречно. Может быть, здесь действует тот же закон?

Пусть, например, ток течет с юга на север, и при этом магнитные силы провода с током направлены по

* Здесь имеется в виду техническое направление тока (см. II.14).

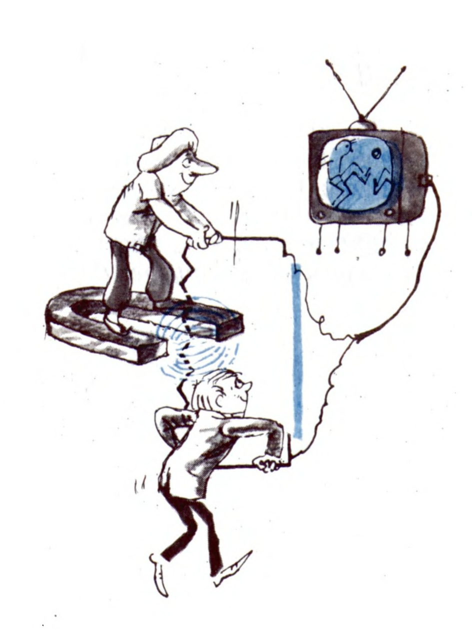
часовой стрелке. В этом случае магнитные линии тока будут идти навстречу силовым линиям магнитной стрелки, если стрелка помещена ниже провода, а северный полюс стрелки смотрит на запад. Прекрасно, это полностью подтверждается опытом! Ну, а если стрелка будет над проводом? Чтобы линии снова были направлены встречно, тот же полюс магнитной стрелки должен смотреть... на восток!

Вот она, настоящая истина! Явление, открытое недавно Эрстедом, объясняется взаимодействием двух магнитных полей!

Так были открыты причины действия провода с током на магнитную стрелку. Теперь каждый школьник может сказать заранее, куда должна повернуться стрелка, потому что в школьных учебниках физики есть очень простое правило: если буравчик ввинчивается по направлению тока, то головка буравчика будет вращаться вдоль магнитных силовых линий, окружающих провод, по которому течет этот ток. Если ток изменит свое направление, значит изменит направление и буравчик. И головка буравчика будет вращаться в обратную сторону, и стрелка станет теперь вести себя наоборот. Все как в опытах Фарадея.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ



II.16

При перемещении замкнутого провода в поле магнита в проводе наводится (специалисты говорят — индуцируется) ток, который называют *током индукции*.

II.17

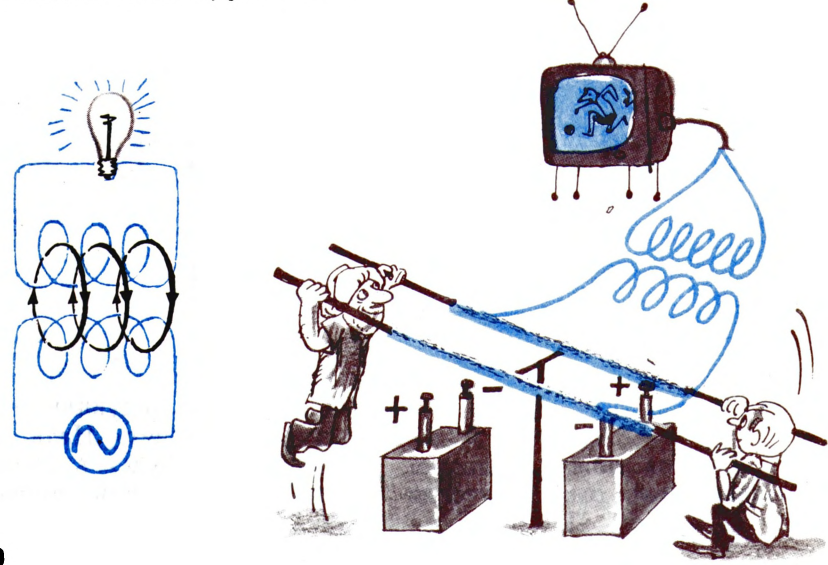
Провод может быть неподвижным. Для получения в нем тока индукции надо двигать магнит. Итак, неважно, что будет в движении — магнит или провод,

лишь бы происходило пересечение силовых линий поля тем проводом, в котором наводится ток.



II.18

Без движения ток не возникнет. Но движение многообразно. Сама цепь может быть неподвижной. Ток индукции появляется, потому что здесь есть *другое движение:* за счет изменений тока, текущего по первой обмотке, вокруг нее происходит *изменение магнитного поля.* Переменное магнитное поле наводит в другой обмотке переменный *вторичный ток.*



II.19

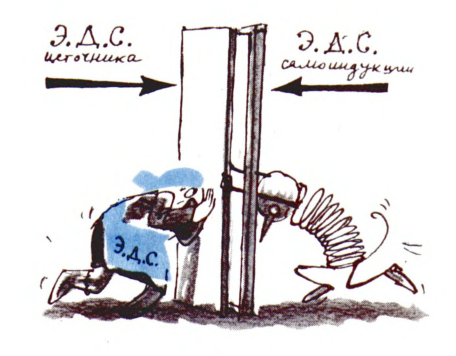
Точно так же работает *трансформатор:* переменный ток в первичной обмотке порождает изменяющееся магнитное поле, а от него во вторичной обмотке наводится переменный вторичный ток. Обмотки трансформатора обычно наматываются на *сердечник,* изготовленный из магнитных материалов, например из железа. Сердечник усиливает возникающие в трансформаторе магнитные поля.

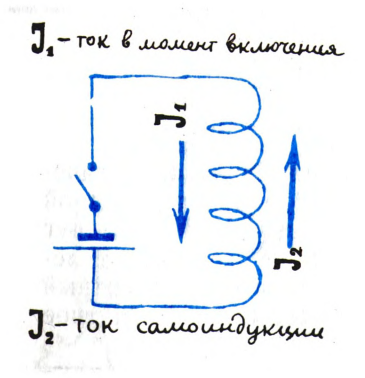


II.20

Ток индукции возникает даже в том случае, если вторичной обмотки нет. В момент включения переменное магнитное поле, порожденное растущим током, наводит в той же самой обмотке *вторичный ток.* Это явление называется *самоиндукцией.*

Эдс самоиндукции всегда препятствует изменению тока, который ее породил. Так гласит правило, установленное Ленцем.

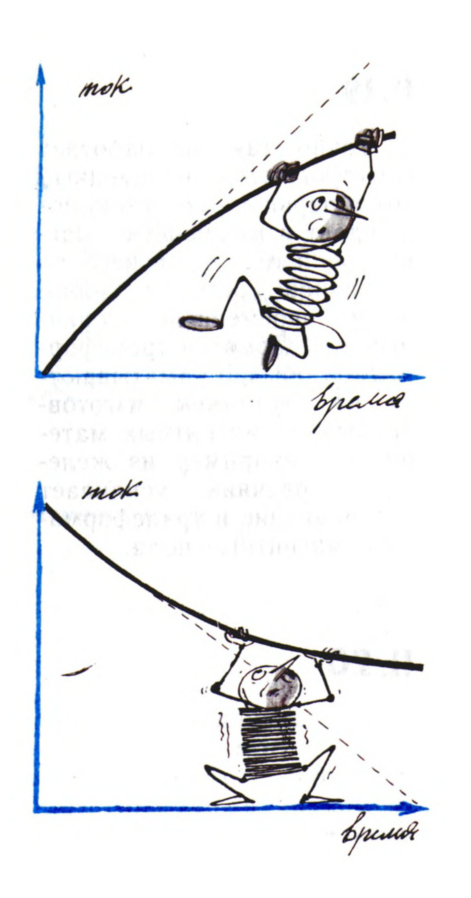




II.21

Благодаря току самоиндукции катушка приобретает своеобразное свойство инерции: она как бы противится изменениям тока, который по ней течет. Если ток уменьшается, ток самоиндукции начинает его поддерживать. Если ток возрастает, ток самоиндукции потечет навстречу и начнет его уменьшать.

Чем больше инерция тела, тем труднее его остановить или разогнать. Чем больше *индуктивность* катушки, то есть число витков на единицу длины катушки, тем сильнее инерция (самоиндукция), тем медленнее нарастает или спадает в катушке ток. Индуктивность имеет свои единицы измерения, которые называются генри (по имени физика Генри).



Интуиция Фарадея

Знаменитый опыт Эрстеда подтвердил связь электричества и магнетизма. Было два различных явления: с одной стороны — электричество, с другой — магнетизм. А тут вдруг появился мостик. Но если можно пройти по мостику от левого берега к правому, нельзя ли совершить и обратный путь? Ток рождает магнитное поле. Может быть, магнитное поле способно создать электрический ток?

Фарадей ищет путь получения этого тока. Он подключает к проводу гальванометр и помещает рядом магнит.

Ток в проводе не возникает. Значит, он ошибается? Нет, тут что-то не так! Безусловно, эти явления обратимы — интуиция Фарадея заставляет его снова и снова проверять эту догадку.

Десять лет Фарадей носит в кармане кусок медного провода и кусок намагниченного железа. В самый неподходящий момент, забыв, где и с кем он находится, Фарадей, словно маньяк, извлекает свои «игрушки» и начинает различными способами располагать провода и магнит. Время от времени он вновь пытается обнаружить с помощью гальванометра появление тока. Но тока по-прежнему нет.

И все десять лет шестое чувство ученого (а быть может, даже седьмое или какое-то другое, еще более высшего порядка) непрестанно подсказывает, что он на верном пути.

Невероятное упорство — десять лет верить в то, что ничем нельзя подтвердить!

Успех пришел неожиданно. Как-то раз он подключил батарею к проводу, намотанному в виде спирали на барабан, и вдруг заметил, что гальванометр, подключенный к другой, изолированной обмотке, одно коротенькое мгновенье показывал ток. Едва заметный бросок стрелки, и... Фарадей сразу понял то, что не мог понять десять лет.

Ток индукции не может возникнуть, пока неизменно магнитное поле. Чтобы ток появился, поле нужно менять. Когда он включил батарею, мгновенно возникло магнитное поле, и в момент, когда оно возрастало, Фарадей случайно заметил, что стрелка совершила бросок. Случайно? Хорошенькая



случайность! Ведь на поиски этой случайности ушло десять лет!

Зато дальше все пошло как по маслу. Не составляло большого труда догадаться, что ток индукции возникнет еще и в том случае, если ток первичной обмотки останется постоянным, зато магнит будет двигаться относительно провода (см. II.17). Или пусть магнит останется неподвижным, зато будет двигаться провод, пересекая те силовые линии, которые окружают магнит (см. II.16).

Во всех этих случаях на провод действует изменяющееся магнитное поле, и под действием этого поля в нем возникает ток.

«Ток возникает лишь при движении магнита относительно провода, а не в силу свойств, присущих ему в покое», — записал Фарадей в свой научный дневник. В этом суть законов *электромагнитной индукции* — возбуждение магнитными силами электрических сил.

На базе установленных Фарадеем законов были созданы новые мощные генераторы тока, где ток возникал в обмотках за счет их вращения в магнитных полях. Затем были созданы трансформаторы тока (см. II.19).

Мир был восхищен великим открытием Фарадея. И все же природа индукции не была еще познана до конца. Едва ли в то время кто-нибудь понимал это лучше, чем сам Фарадей. Каким образом одна катушка влияет на другую, если между ними нет проводов? Очевидно, здесь действует поле. А что это поле собой представляет?

Эрстед доказал, что ток рождает магнитное поле.

Фарадей доказал, что магнитное поле рождает ток.

Эта взаимная обратимость явлений все еще осталась непознанной, надо было вновь вникать в природу этих явлений, искать между ними какую-то более глубокую связь.

Двуединые волны

Так всегда бывает в науке: сначала накапливаются факты, потом возникает потребность их обобщать.

К тому моменту, когда Максвелл задался целью обобщить все, что известно об электричестве и магнетизме, фактов было хоть отбавляй. Наука и практика нашли множество применений рожденному током магнитному полю и знали десятки способов превращения энергии магнитного поля в электрический ток.

На этих двух принципах были построены все измерительные приборы.

Всюду использовались те же явления. Ток рождался магнитным полем, магнитное поле влияло на ток. Тут все обратимо, как в динамо-машине: если пустить ток по обмоткам, машина служит электромотором, если вращать машину другим мотором, она начнет вырабатывать ток. Обратимость эта имеет ту же природу: либо магнитное поле тока заставляет вращаться ротор машины, либо, вращая ротор в поле магнита, мы получаем в обмотках ток.

Меняя магнитное поле вблизи провода, можно создать в проводе ток, а в пространстве, окружающем провод с током, возникают поля. Ток течет по проводу, а в пространстве взаимодействуют электрические и магнитные силы.

Ну, а если провода нет? Если создать электрическое поле в пространстве и заставить его меняться? Что будет тогда?

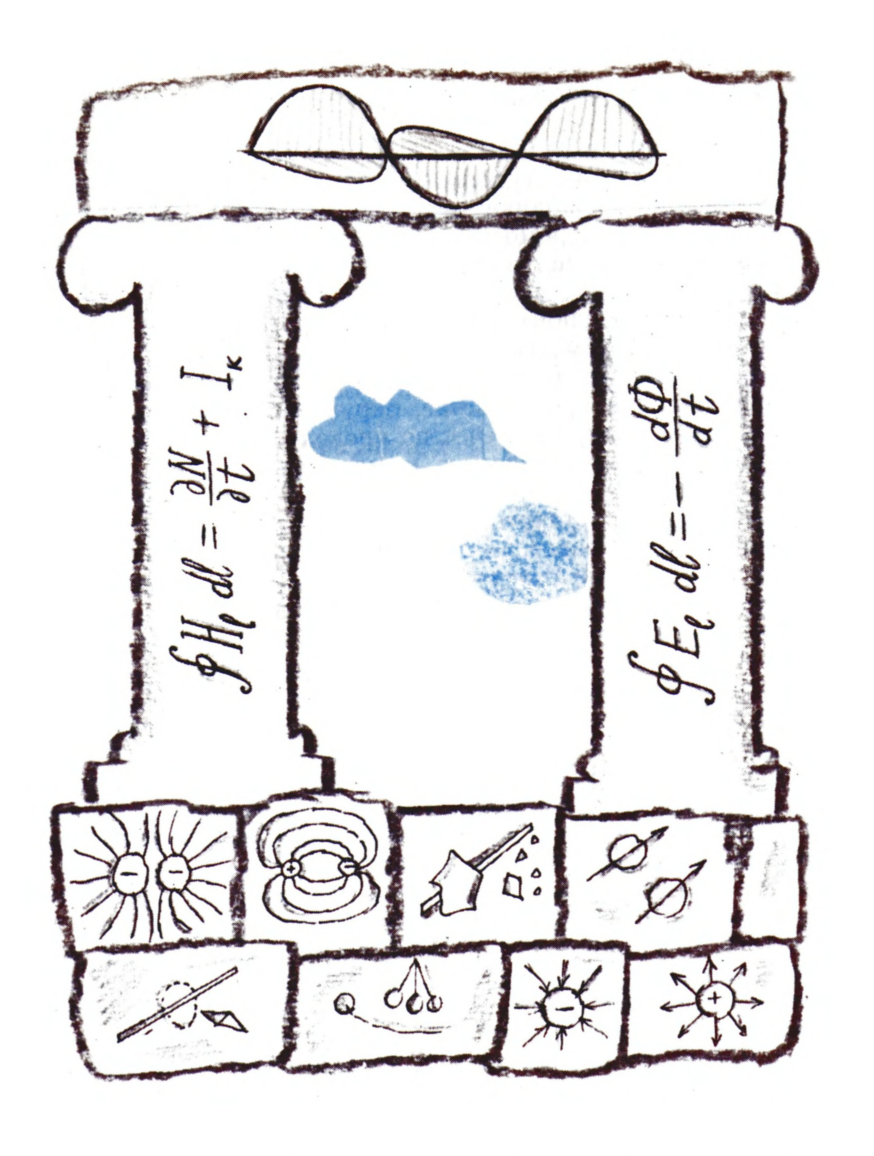
Джемс Кларк Максвелл впервые поставил этот вопрос, и он же дал на него ответ. И не просто ответ, а стройную законченную систему математических уравнений — теорию электромагнитных полей. Недоставало лишь одного звена в цепи всех известных явлений, связывающих электричество с магнетизмом, и Максвелл ввел в теорию это звено.

Если в пространстве существует переменное электрическое поле, значит оно порождает поле магнитное. Так, будто есть в этом пространстве воображаемый провод, будто течет по этому проводу воображаемый ток. Этот ток Максвелл назвал *током смещения* в отличие от обычного *тока конвекции* — движения обладающих зарядом частиц.

Наука не знала такого явления, где бы при отсутствии провода с током взаимодействовали эти поля. Но все известные факты говорили в пользу этой догадки. Тысячи опытов, сотни приборов, основанных на неразрывной связи электрических и магнитных полей, подтверждали это предположение. Правда, в опытах и в приборах неизменно присутствовали провод и ток. Ну что ж, значит, возможности пока ограничены: мы еще просто не научились непосредственно обнаруживать электромагнитное поле, не изучили всех его свойств.

Так решил Джемс Максвелл, и история подтвердила его правоту.

Эта мысль нашла отражение в системе его уравнений, и теория стала удивительно стройной. Все открытые наукой явления стали частными случаями уравнений Максвелла. Словно зеркало, отражали они взаимную связь и обратимость явлений: одно из них говорило о том, как зависит



электрическое поле от изменения магнитных потоков; второе показывало, каким образом влияет на магнитное поле изменение действующих в пространстве электрических сил.

Возникнув в том месте, где есть провод с током, электромагнитное поле будет распространяться в пространстве, занимая все больший и больший объем. Можно отделить поле от провода, но нельзя отделить электрические поля от маг-

нитных — они связаны неразрывно в единой *электромагнитной волне.*

В природе нет дальнодействия. Значит, электромагнитное поле не может мгновенно воздействовать на тело, если тело удалено. Волна приближается постепенно. Из формул Максвелла следовало, что скорость ее движения точно равна скорости света.

Ничего себе «постепенно»! Двигаясь с такой скоростью, волна всего за одну секунду почти восемь раз обежит земной шар! *

Неожиданный вывод

Заслуга Максвелла огромна. И все же нельзя умолчать о том, что за много лет до открытий Максвелла их предрек Фарадей. Еще в 1832 году, пытаясь вскрыть природу индукции, Фарадей пришел к выводу, что в этих явлениях возбуждение передается на расстояние особыми колебаниями, похожими «на колебания взволнованной водной поверхности или же на звуковые колебания частиц воздуха».

Кроме того, он писал:

«...Влияющая причина (которую я позволю себе назвать магнетизмом) распространяется от магнитных тел постепенно и для своего распространения требует определенного времени, которое, очевидно, будет найдено очень незначительным».

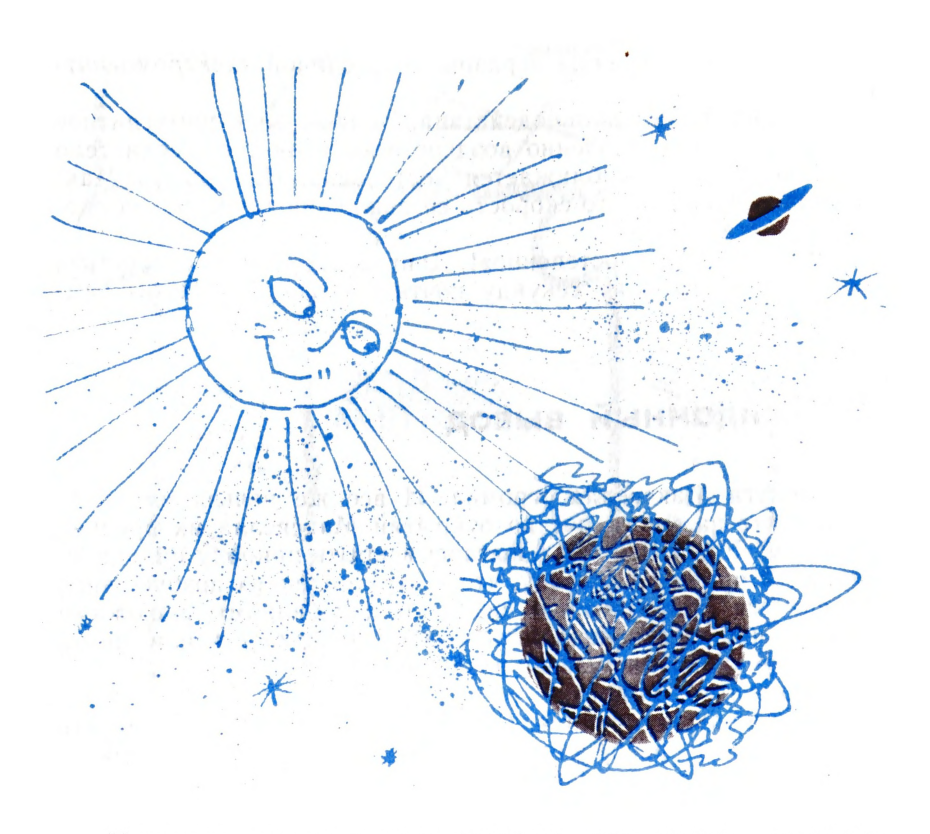
Но ведь именно это и доказал Максвелл!

Среди многочисленных идей Фарадея эта идея была, пожалуй, единственной, которую он не мог проверить собственными руками. Вероятно, поэтому он не решился высказать ее вслух. Фарадей оставил письмо, которое просил вскрыть только через 100 лет.

В 1938 году письмо было прочитано членами Британского королевского научного общества и дало возможность еще раз убедиться, какой потрясающей интуицией обладал Фарадей. Ведь к тому времени эти идеи нашли подтверждение не только в теории, но и в экспериментах Герца и в многочисленных средствах связи, основанных на использовании движущихся с огромной, но все же конечной скоростью (точно по Фарадею!) электромагнитных волн.

---

* Скорость света в пустоте составляет приблизительно 300 000 километров в секунду.



Максвелл доказал, что скорость эта равна скорости света.

Что это, случайное совпадение?

Нет, Максвелл не поверил в случайность. Он стремился в разных явлениях найти взаимную связь. Раз электромагнитные волны движутся со скоростью света, значит *свет — это тоже электромагнитные волны.*

Так в результате исследований связей электричества и магнетизма вдруг обнаружилось совсем неожиданное родство. Десятки ученых изучали связь электрических сил с магнитными. Но кто мог думать, что теми же силами рождается видимый свет!

Смелый гений Максвелла вскрыл это единство. Волны света имеют ту же природу, что и волны, возникающие вокруг провода, в котором есть переменный ток. Они отличаются друг от друга только длиной. Очень короткие волны являются видимым светом. Более длинных в то время обнаружить еще не могли.

Лишь спустя 12 лет после смерти Максвелла Генрих Герц сумел излучить и принять эти волны, подтвердив справедливость идей своего гениального предшественника.

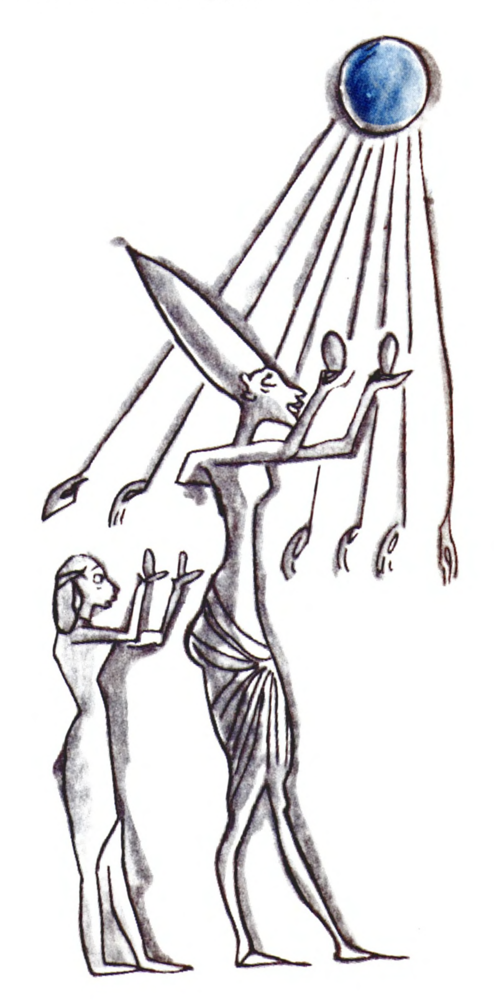
А несколько десятилетий спустя тысячи радиостанций уже насыщали околоземное пространство этими волнами, и они несли на себе сообщения со всех концов света и на всех языках.

История света

Прежде чем идеи Максвелла объединили свет и электромагнитные волны, наука о свете тоже успела пройти долгий, нелегкий путь.

Свет привлекал внимание людей с древности. Не требовалось специальных приборов, чтобы его обнаружить. Мир наполнен лучами солнца, и только благодаря свету человек мог познавать этот солнечный мир. Вот почему первый «научный диспут» о свете состоялся еще три с половиной тысячи лет назад. Инициатором «диспута» был фараон Аменофис IV, живший в XIV веке до нашей эры.

Вопреки существовавшим в то время теориям, утверждавшим, что свет излучают глаза бога Амона, Аменофис IV пришел к выводу, что свет исходит из Солнца. Солнце тоже считалось богом, которого звали Атоном. Аменофис IV в директивном порядке утвердил новые взгляды: он приказал вместо Амона поклоняться Атону и в честь этого нововведения изменил свое имя на Эхнатон. Аменофис — значит любезный Амону, Эхнатон — угодный Атону. Новое имя полностью соответствовало духу новых идей.



Древние греки рассудили иначе. Установив тот факт, что только благодаря свету человек может видеть предметы, они пришли к выводу, что свет излучается самими вещами. «Частицы света» достигают глаз человека, и благодаря этим частицам можно видеть предмет.

Однако в трудах античных философов можно встретить и другие воззрения. Платон, например, в своих знаменитых «Диалогах» высказывается так:

«Из органов боги прежде всего создали *светоносные глаза»*.

Это уже шаг вперед по сравнению с Аменофисом-Эхнатоном. Согласно Платону «светоносным зрением» обладают не только боги — им наделен сам человек.

А впрочем, трудно сказать, ближе ли это к истине: у Аменофиса свет существует вне человека, у Платона источником света является сам человек. Его глаза как бы «прощупывают» предметы излученным ими лучом.

Ясность в этом вопросе наступила значительно позже. Примерно в 1000 году нашей эры знаменитый арабский ученый Абу Али Хайсам (в истории он известен под именем Альгазена) впервые провозгласил, что видим мы *отраженный предметами* свет.

Но что этот свет собой представляет?

Великий Ньютон оставил нам свою теорию света, в которой возродились идеи античных философов. Ньютон тоже считал, что свет состоит из частиц. Правда, его частицы (он назвал их корпускулами) излучались уже не глазом и не вещами: Ньютон хорошо представлял себе, что видимые предметы лишь отражают свет.

Затем Максвелл создает электромагнитную теорию света, и она завладевает умами ученых настолько, что о корпускулах света перестают вспоминать. Зато вспоминают Гюйгенса и Френеля, современников и противников Ньютона, утверждавших, что, встречаясь с препятствиями, свет ведет себя так, будто он состоит не из частиц, а из волн.

И вот спустя несколько десятилетий наука сталкивается с явлением, которое вновь заставляет пересмотреть взгляды на свет.

Под действием света металл излучал электроны так, будто на него обрушился град каких-то частиц. Волны Максвелла таких явлений объяснить не могут. Изучая этот эффект (он был назван фотоэффектом), Эйнштейн вновь вернулся к идее корпускул Ньютона и добавил к ряду открытых ранее элементарных частиц материи частицу света — фотон.

Вот типичный пример диалектики: переоценка на новом

этапе развития прежних взглядов и прежних идей. От корпускул света Ньютона — к волнам Гюйгенса и Френеля, от них — к идеям Максвелла об электромагнитных волнах, а затем к фотонам Эйнштейна, устранившим «белые пятна» в волновой теории света, — таковы основные этапы эволюции взглядов науки на свет.

И вот, наконец, современная теория света — еще один яркий пример диалектического единства противоположных качеств явлений: в одних явлениях свет проявляет свои волновые свойства, в других — ведет себя как поток легких частиц.

Но зачем понадобилось в книге об электронике излагать историю света?

Можно было бы не касаться этой истории, если бы в последние годы не возникла фотоника, создающая генераторы света и конкурирующая с электроникой в решении целого ряда задач.

Где начинается радио?

Есть радио. Есть электроника. Две области техники, тесно связанные между собой. Где граница, отделяющая их друг от друга?

Электроника занимается разработкой электронных приборов — ламп, электронных трубок, полупроводников. Роль радио не требует разъяснений. И тем не менее...

Может ли быть радио без электроники? Трудно представить себе современный передатчик или приемник без полупроводников или ламп. Но вот, оказывается, можно осуществить связь и на фотонных приборах. В этом случае передача ведется не на радиоизлучениях, а на световых лучах.

Радио это или не радио? Придется заново вникнуть в смысл слова «радио», чтобы ответить на этот вопрос. Слово «радио» происходит от латинского слова «радиус», что означает по-русски «луч». Радио может работать на различных лучах. Тем более что и свет и те излучения, которыми пользовалось радио до последнего времени, имеют одну и ту же природу.

Максвелл установил эту истину около ста лет назад. Почему же только в последние годы возникли системы связи на световых лучах?

Дело в том, что на первых порах развития техники связи ей было легче справляться с более длинными волнами. После



открытий Максвелла наука упорно искала путей получения этих невидимых волн. Зачем? Не только затем, чтобы подтвердить или опровергнуть идеи Максвелла. Многие понимали, что, изучив эти волны, наука сумеет их приспособить и для практических дел. Для каких именно? Кто мог знать, какие возможности таят в себе волны, которых никто еще не наблюдал? Трудно было делать прогнозы, совершенно не зная их свойств. Даже сам Генрих Герц, которому впервые в истории удалось получить эти волны, утверждал, что никакой практической пользы в его открытии нет.

И вместе с тем именно в опытах Герца зародился тот принцип, который со временем стал основой всякой беспроволочной связи: *излучение* и *прием*.

«Надо изобрести прибор, который заменил бы недостающие человеку электромагнитные чувства», — так сформулировал задачу наш выдающийся соотечественник Александр Степанович Попов.

И вскоре он доказал, что такие приборы действительно могут быть созданы. Сначала они начали «чувствовать» грозовые разряды. А в 1896 году состоялась первая телеграфная передача по радио на расстояние 600 метров из Химического института в Петербургский университет. В такой связи флот в то время нуждался особенно остро. На земле могли обходиться и проводом. Но не потянешь же провод от берега на ушедший в море корабль!



Не каждый обладает способностью оценить значение новых открытий. Когда Попов обратился в морское ведомство с просьбой выделить для продолжения опытов 1000 рублей, морской министр ответил: «На такую химеру отпускать денег не разрешаю».

Тем не менее с помощью этой «химеры» Попов два года спустя обеспечил связь между двумя кораблями на расстоянии сорока километров,

а в 1900 году передавал по радио указания из Кронштадта на остров Гогланд, где велись работы по спасению броненосца «Генерал-адмирал Апраксин», севшего там на мель.

Создание первой линии радиотелеграфной связи случайно совпало с каким-то торжественным юбилеем царской семьи. Местные власти решили, что первая радиограмма будет прекрасным подарком царской фамилии, и заготовили поздравительный текст. Но вместо этого Попов, на свой страх и риск, передал сообщение совершенно иного рода: о том, что шторм унес в море льдину, на которой остались 27 рыбаков. Вышедший навстречу корабль вовремя подошел им на помощь. Беспроволочная связь помогла спасти людям жизнь.

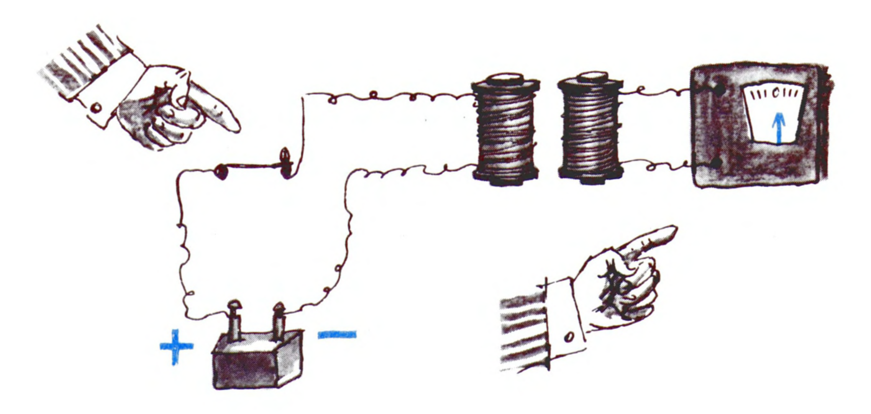
Так радио стало получать признание, а об электронике еще не ведал никто.

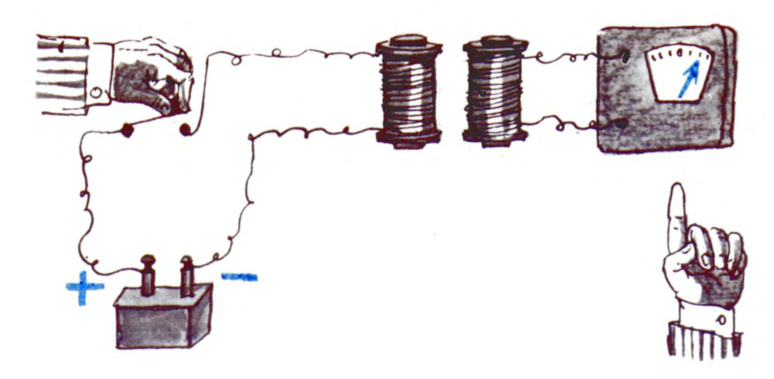
Опять радио без электроники: ведь Попов в своих первых радиостанциях обходился без электронных ламп!

О связи без проводов

Оказывается, для радиосвязи лампы вовсе не обязательны.

С трансформатором, очевидно, сталкивался каждый. Но едва ли кто-нибудь предполагает, что между первичной и вторичной обмотками существует радиосвязь. И тем не менее она действительно существует: вторичная обмотка служит приемником волн, которые излучает первичная цепь.



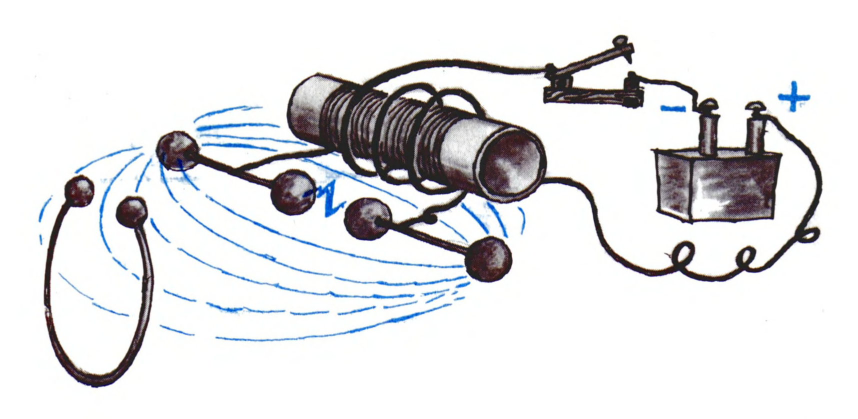


Возьмем две расположенные рядом катушки. Одна пусть подключена к полюсам батареи, в цепь другой включен измерительный прибор. Когда по первичной обмотке течет ток, стрелка прибора стоит на нуле.

Но вот мы отключаем батарею от первичной обмотки — во вторичной стрелка прибора совершает бросок. Почему? Потому что в момент отключения изменяется поле первичной обмотки, и в витках вторичной, находящейся на расстоянии от первичной, наводится электрический ток индукции. Такая картина будет наблюдаться всегда, надо лишь, чтобы во всех случаях катушки находились рядом друг с другом, тогда между ними будет возникать своеобразная «радиосвязь». В трансформаторе обмотки сажают на общий железный сердечник, который служит благоприятной средой для «прочной связи» магнитных полей. Если ток первичной обмотки будет все время меняться, он возбудит переменное поле. Переменное поле породит во вторичной обмотке переменный вторичный ток (см. II.19). В трансформаторах связь между обмотками осуществляется через железный сердечник, а в расположенных рядом катушках — через разделяющую их пустоту.

А нельзя ли раздвинуть обмотки подальше и сохранить между ними связь? Оказывается, можно. Именно это и доказал своим знаменитым опытом Генрих Герц. Правда, для усиления связи пришлось отказаться от обычных обмоток и заменить их специальным вибратором. А поле в пространстве вокруг вибратора создавалось с помощью искр. Искра проскакивала между двумя шарами, получавшими определенный заряд.

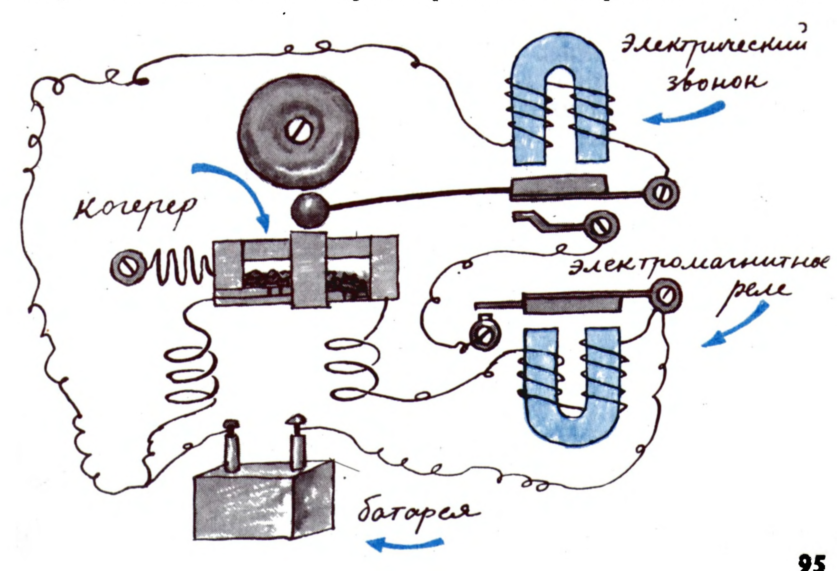
Еще в опытах с лейденской банкой было замечено, что искра, возникающая между обкладками банки, ведет себя своеобразно: за какой-нибудь миг она несколько раз изменяет свое направление, и соответственно знаки зарядов обеих



обкладок тоже изменяются столько же раз. *Искрой рождаются колебания* — вот из чего исходил в своих опытах Герц.

Рядом с разрядным устройством он поместил петлю второго вибратора, на концах которой укреплялись другие шары. Поле, рожденное искрой, наводило в петле токи индукции, и между шарами второго вибратора тоже проскакивала слабенькая искра. Чтобы связь между излучающим и приемным вибраторами усиливалась, Герц помещал их в фокусы специальных зеркал.

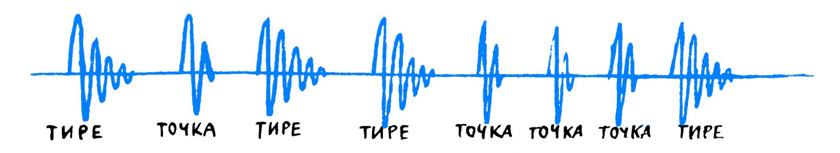
Опираясь на опыты Герца, Попов создал первую радиостанцию, принцип которой описан в сотнях газет, журналов и книг. Так же как в опытах Герца, между двумя электродами при их приближении проскакивала электрическая искра. От нее во все стороны разбегались радиоволны. Для



связи приемника и передатчика Попов применил антенны, и этот принцип, введенный Поповым, дожил до наших дней. Под действием волн, воспринятых приемной антенной, уплотнялись частички металла в так называемом когерере, и когерер начинал пропускать электрический ток. Срабатывало реле, когерер получал «легкую встряску», частицы вновь рассыпались внутри когерера и ждали, когда появится следующий «всплеск» радиоволн.

В этом простом устройстве был один недостаток — слишком короткий сигнал. Искра проскакивала мгновенно, и волны, которые она порождала, гасли, едва успев появиться на свет.

Что можно передать такими сигналами? Только телеграфную азбуку: точка — точка — тире. Передавать же человеческий голос сложнее. Надо было создать незатухающие радиоволны, научиться транспортировать звук «верхом» на радиоволнах и, поймав эти волны приемной антенной, усилить их настолько, чтобы они могли раскачать диффузор динамика, воспроизводящего звук.



Для излучения непрерывных сигналов и их усиления и создал Ли де Форест свой знаменитый триод.

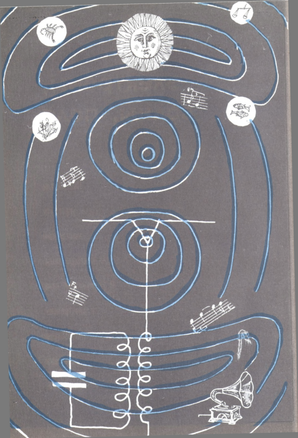
Вот тогда родилась электроника.

Впрочем, термина «электроника» нам не удастся найти в словарях или каталогах, составленных в те времена. Термин родился позже. И все же лампа и электронная трубка — это два первых ростка электроники, из которых суждено было вырасти дереву, давшему множество неожиданных и чудесных плодов.

ГЛАВА III

ЭЛЕКТРОНЫ, ВОЛНЫ, ПОЛЯ

Как смогли
управлять
электронами
с помощью поля.
О содружестве волн
с электронами,
породившем
всемирную
радиосвязь.

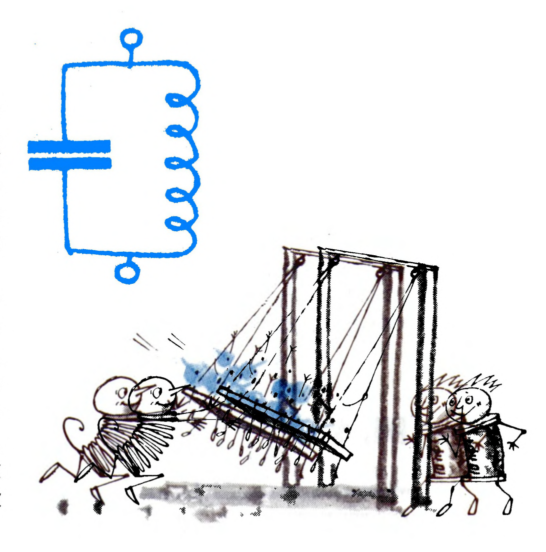


ЗДЕСЬ РОЖДАЮТСЯ КОЛЕБАНИЯ

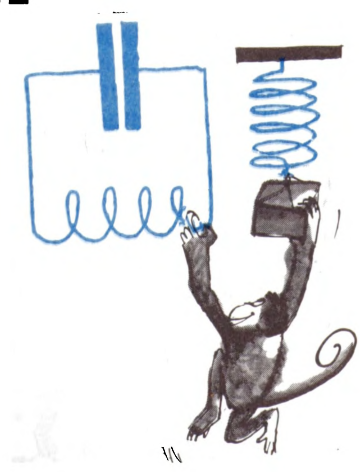
III.1

Катушка и конденсатор, соединенные параллельно, образуют колебательный контур — устройство, играющее в электронике и в радиотехнике выдающуюся роль.

В контуре рождаются колебания, подобные колебаниям маятника или струны. Но маятник и струна колеблются сами, а детали контура неподвижны. Здесь колебания рождаются электронами — колеблется электрический ток.

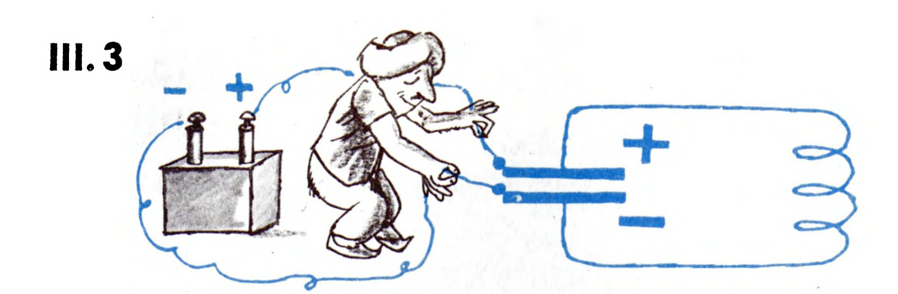


III.2



Внешнее сходство иногда бывает обманчивым. В этом устройстве пружина, внешне похожая на катушку, на самом деле играет роль конденсатора. А груз, подвешенный на пружине, хоть и не похож на катушку внешне, зато имеет с ней более глубокое сходство. Груз обладает инерцией. Катушка — тоже. Тот, кто забыл, чем она обусловлена, может взглянуть еще раз на рисунки II.20 и II.21.

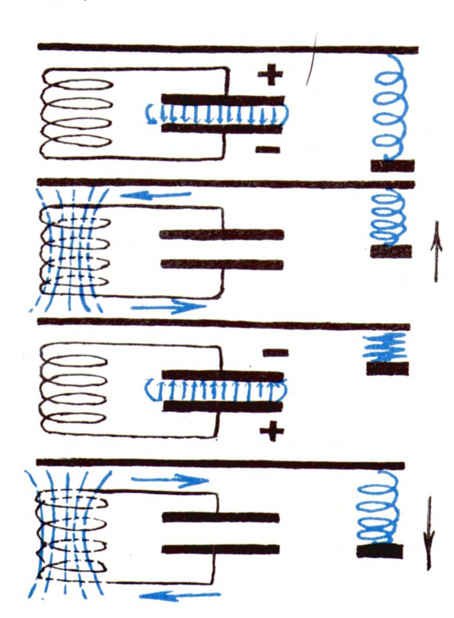
III.3



Если на короткое время к пластинам конденсатора подключить источник напряжения, вся энергия сначала сосредоточится в конденсаторе. Аналогичное состояние пружины с подвешенным грузом возникнет в том случае, если растянуть, а затем отпустить пружину, предоставив систему самой себе.



III.4



Пружина начнет сжиматься, груз вернется к своему среднему положению, но движение не прекратится: благодаря инерции груза он будет двигаться вверх и, сжав пружину, опять передаст всю энергию ей.

То же самое происходит и в контуре. Конденсатор



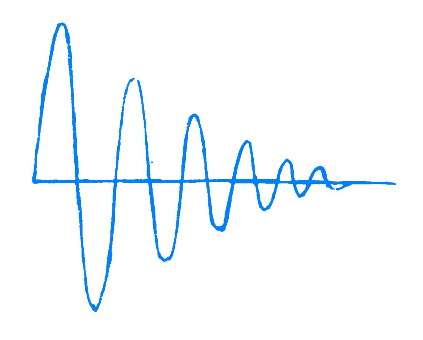
отдал всю энергию, а ток в контуре не прекратился. Он течет «по инерции». Его направление пока сохраняется прежним (груз все еще движется вверх). На верхней пластине конденсатора электронов «толпится» все больше и больше. Сначала они уменьшили положительный потенциал до нуля, но ток продолжает течь «по инерции» и нуль превращается в «минус». А на противоположной пластине образуется «плюс».

Пружина раньше была растянута, а теперь оказалась сжатой. Заряды пластин конденсатора перераспределились, пластины изменили свой знак.

Когда пружина сжата предельно, наступает момент изменения направления движения груза: раньше он двигался вверх, теперь начнет двигаться вниз.

После того как конденсатор приобрел заряд противоположного знака, ток изменит свое направление *.

III.5



Вновь груз достигает среднего положения, а затем по инерции растягивает пружину. Снова на конденсаторе поменялись местами «минус» и «плюс».

Система вернулась в исходное состояние (см. III.3). Закончился цикл (или период) собственных колебаний контура.

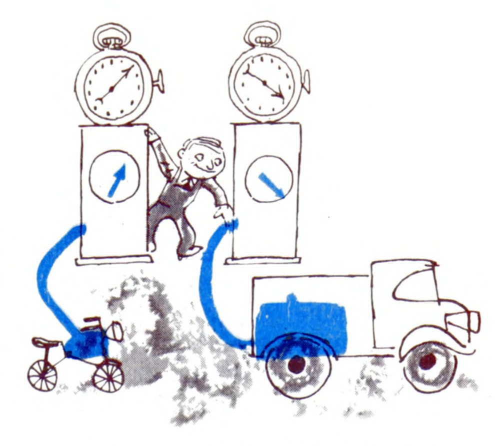
Почему «собственных»? Читатель, очевидно, уже заметил, что посторонний источник понадобился только в самом начале процесса (см. III.3). А потом его отключили, и контур обходится собственными силами, создает собственные колебания, имеющие собственную частоту. Цикл повторяется неоднократно, система несколько раз подряд проходит положения, изображенные на рисунке III.4, но с каждым разом размах колебаний будет все меньше и меньше, и в конце концов они прекратятся совсем.

* На всех рисунках показано техническое направление тока.

III. 6

Сколько же времени занимает каждый цикл колебаний контура?

Очевидно, что время это зависит от свойств «пружины» и «груза». И действительно, время каждого цикла определяется емкостью конденсатора и индуктивностью катушки. Чем больше емкость, тем больше времени длятся заряд и разряд конденсатора. Чем больше индуктивность катушки, тем медленнее нарастает и спадает текущий внутри контура ток (см. II. 21).



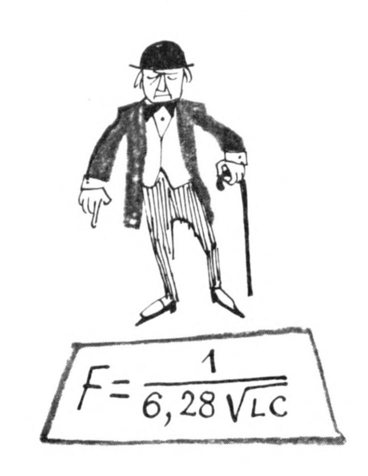
III. 7

Количество полных циклов (периодов) собственных колебаний контура в течение одной секунды определяет его собственную частоту.

С увеличением емкости и индуктивности период становится более длинным, число циклов в секунду уменьшается — падает собственная частота.

Эта зависимость выражается формулой Томсона:

$$F = \frac{1}{6{,}28\sqrt{LC}}.$$



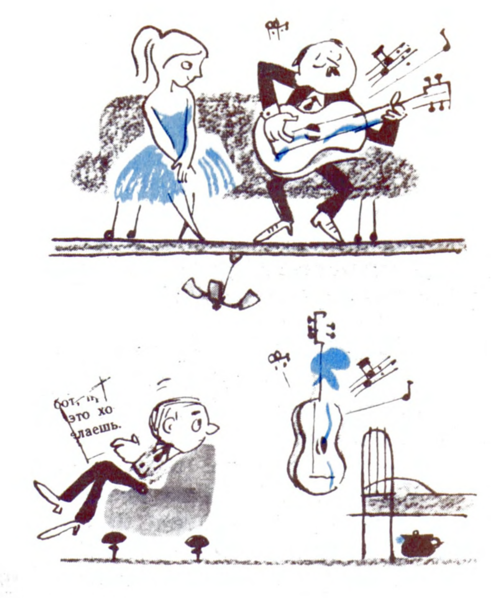
В формуле F — частота (число колебаний в секунду), L — индуктивность (в генри), C — емкость (в фарадах).

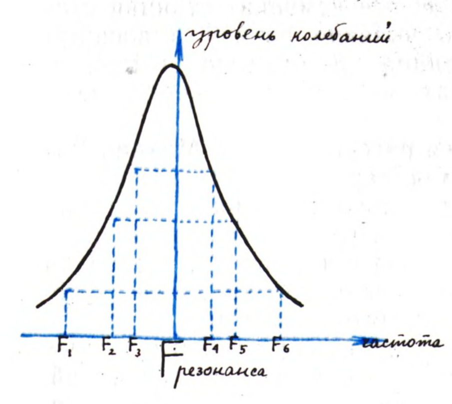
III. 8

Всем знакомо явление резонанса. Например, благодаря резонансу струна отзывается на звуки другой струны. При этом струна зазвучит особенно сильно, если частота внешнего звука совпадет с ее собствен-

ной частотой. Так же ведет себя радиоконтур. Колебания тока в контуре будут особенно сильными, если частота подведенных к контуру колебаний (сигнала) совпадает с его собственной (резонансной) частотой.

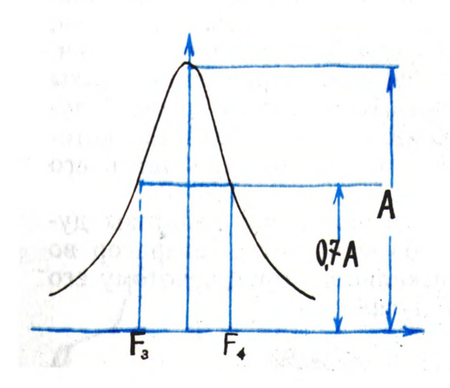
При изменении частоты сигнала в любую сторону от резонанса колебания в контуре начнут уменьшаться. Это свойство хорошо отражает график, похожий по внешнему виду на колокол. Такая кривая именуется *резонансной характеристикой* контура.





III.9

На сигналы, частоты которых далеки от резонанса, контур не отзовется. Принято считать, что контур свободно пропустит сигналы с частотами, лежащими между F_3 и F_4 (на этих частотах уровень колебаний контура составляет 0,7 от уровня колебаний его при резонансе).





От искр к непрерывному излучению

Был момент в истории радио, когда оно обходилось без электроники. Но что это было за радио!

...Шла первая мировая война. За два километра от Ходынки непрерывно слышался грохот разрядов — это московская радиостанция излучала в пространство сигналы мощностью около 100 киловатт. 100 киловатт — мощность немалая. Обычная электроплитка потребляет лишь около 0,5 киловатта. Но, несмотря на большую мощность, ничего, кроме азбуки Морзе, превращаемой в искры разряда, эта станция передавать не могла. Такие же станции работали и в других городах Европы. На кораблях военного флота тоже использовалась телеграфная радиосвязь. Сигналы, передаваемые по радио, легко перехватывались противником. Немцы следили по ним за маневрами англичан и французов. Союзники пеленговали корабли немецкого флота и пытались разгадывать секретные коды штабных команд.

И тут случилось необычайное: все немецкие станции стали вдруг упорно молчать. Это вызвало панику в военных штабах России, Англии, Франции: несомненно, готовится какой-то подвох, немцы держат в секрете какое-то новшество.

Секрет разгадал выдающийся русский ученый Михаил Васильевич Шулейкин. Оказывается, германцы перешли на непрерывное излучение волн. А приемники союзников были рассчитаны на прием искровых телеграфных сигналов: в передатчике искра — в приемнике слышен щелчок. А тут волна шла непрерывно и несла на себе следы азбуки Морзе, которые старые типы приемников выделять не могли.

Шулейкин нашел рецепт, позволивший с помощью старых приемников «засекать» излучения новых немецких станций. Он предложил прерывать сигнал прямо на входе приемника, то есть сделать его похожим на привычные всплески волн. И тогда с приходом сигнала вновь стали слышны щелчки.

Впоследствии оказалось, что первые непрерывные волны были получены немцами с помощью «генератора поющей дуги». Генератор этот был создан ирландцем Дудделем, который взял радиоконтур (см. III.1) и стал подталкивать его непрерывным потоком искр.

Для получения искр Дуддель использовал вольтовы дуги. Контур настраивался на звуковые частоты, генератор во время работы издавал звук музыкального тона, и потому его окрестили «генератором поющей дуги».

Как рождаются колебания и как они умирают

Контур — устройство несложное. Катушка из провода и конденсатор включены параллельно (специалисты говорят — в параллель) (см. III.1). Обе детали были давно известны науке. Конденсатор сродни лейденским банкам. Катушка — это тот же соленоид Ампера (см. II.15). Но когда американский ученый Томсон заставил эти детали работать совместно, он получил такие процессы, которые не утратили ценности и по сегодняшний день.

В контуре рождаются колебания — явление, имеющее множество аналогий в совершенно различных технических областях.

Можно вспомнить о маятнике, струне, камертоне, качелях. Все эти устройства после толчка будут совершать колебания с определенной собственной частотой (см. III.5).

Качели, струна, маятник колеблются сами. Детали контура неподвижны. Движущиеся же его «детали» невидимы: в контуре колеблются электроны и создают *переменный, колеблющийся* ток (см. III.1).

Катушка и конденсатор попеременно передают друг другу энергию, как теннисисты мяч.

Однако давно установлено, что «вечный двигатель» построить нельзя. Если вы привели систему в движение, то из-за трения часть энергии неизбежно превратится в тепло. Если потеря энергии не восполняется внешним источником, то движение прекратится, потому что вся энергия в конце концов рассеется в виде тепла. Тепло улетучивается в пространство, и в любом «вечном двигателе» раньше или позже наступает «вечный покой».



По той же самой причине прекращаются колебания маятника или качелей. Трение между деталями и сопротивление воздуха заставляют останавливаться и качели, и маятник, и подвешенный на пружине груз. В колебательном контуре движутся электроны. Неужели силы трения действуют и на них?

Да, своеобразное трение существует и здесь. Катушка обладает сопротивлением. Преодолевая его, электроны теряют энергию, и она, так же как в маятнике или в качелях, целиком переходит в тепло. Колебания ослабевают и в конце концов прекращаются совсем.

Радио очень нуждается в колебаниях тока, которые, возникнув однажды, продолжались бы долгое время. Их легко превратить в непрерывные волны. А на таких волнах передать можно все что угодно: речь, музыку, изображение, а если нужно, то и прерывистый телеграфный сигнал.

Но как получить непрерывные колебания?

Для этого надо непрерывно «подталкивать» контур. Причем подталкивать легче в том случае, если частота толчков совпадет с собственной частотой этого контура, — получится резонанс.

Но кто будет подталкивать?

Опять нужен контур. Чтобы толчки шли непрерывно, колебания в нем не должны затухать. Значит, для этого опять-таки надо его «подталкивать» в такт с его собственной частотой.

А кто его будет подталкивать? Тоже контур? Но в этой цепочке никогда не найдешь начала. А нельзя ли замкнуть цепочку кольцом?

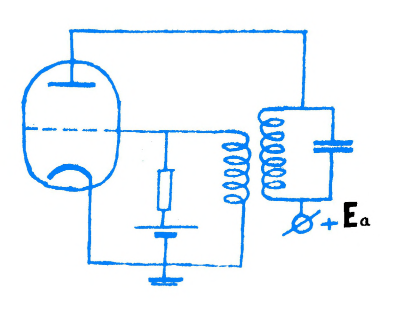
Почему текут реки?

Едва ли на свете есть люди, которые не любили бы рек. Реку любят за то, что в ней водится рыба, что в жаркий день она утоляет жажду и дарит прохладу, а зимой превращается в лыжную трассу и веселые пятна катков.

А еще реку любят за то, что она никогда не стоит на месте, за то незабываемо величавое, вечное, что находит свое отражение в нескончаемом беге воды. Проходят дни, годы, столетия, а вода в реке все бежит и бежит. Откуда? Куда?

А в самом деле — куда и откуда? Это уже не лирика, а вполне деловой вопрос.

Каждый знает, что реки текут от истоков и впадают в моря. Но если из века в век река отдает свою воду морю, и



при этом не иссякает, то откуда берется в ней такая масса воды?

Прибывает она с неба в виде дождей и снега. На небо попадает из озер, морей и океанов. А то, что теряют за счет испарения озера, моря и океаны, вновь пополняется реками. Конечно, читатель уже догадался, для чего мы, прервав разговор о колебаниях в контуре, вспомнили вдруг о круговороте воды. Ведь в движении рек есть именно то, чего не хватало нам для поддержания незатухающих колебаний, — замкнутый круг. Из океана — в облако, из облака — в реку, из реки — опять в океан.

Вот так же работает и генератор. Колебательный контур подключен к аноду триода. А для того чтобы колебания не затухали, часть колеблющейся энергии анодного контура подается на сетку нашего триода. Попав на сетку, колебания начнут управлять током, протекающим через триод. Колеблющийся ток будет раскачивать контур, включенный в анодную цепь. Сколько раз повторятся колебания в контуре, столько раз изменится управляющее напряжение сетки.

С каждым тактом будут возникать всплески анодного тока, которые станут «раскачивать» контур в такт с его собственной частотой. Вместо бесконечной цепочки получился замкнутый круг.

Колебания, однажды родившиеся в контуре, попав на сетку, будут усилены и начнут раскачивать контур еще сильней. А из контура — снова на сетку, а оттуда — опять в анод.

В усилителе сигнал, подведенный к сетке триода, связан с анодным током (см. I.25—I.34). А в генераторе наряду с этой связью предусмотрена еще и *обратная связь:* часть энергии из анода вновь попадает на сетку, и лампа будет усиливать собственные сигналы.

Такой режим специалисты по электронике называют *самовозбуждением.*

В рассмотренном нами круговороте воды в природе тоже можно найти своеобразную «обратную связь». Пополнение морей и океанов водой, доставленной реками, — связь прямая. Пополнение же рек дождями от испарения водоемов — это обратная связь. А откуда берется энергия в круговороте воды и при создании электрических колебаний? В первом случае ее поставляет Солнце. А во втором — источник постоянного тока, питающего анод. Итак, источник — это своеобразное Солнце, контур в аноде — море, река — электроны, текущие от катода к аноду, а передача части энергии с анода на сетку — это дожди. В этом круговороте энергия постоянного тока источника превращается в энергию незатухающих колебаний.

Лишь какую-то часть постоянного тока можно превратить в колебания: генератор всегда потребляет больше энергии, чем несут в себе те колебания, которые он породил. Если хотя бы половина энергии, отбираемой от источника постоянного тока, превращается в энергию колебаний, считается, что генератор работает хорошо. Кстати, с нашей земной точки зрения Солнце расходует силу куда менее рационально: почти вся она рассеивается в космосе, а до нас доходит лишь ничтожная ее часть.

В наших же генераторах около половины энергии источника превращается в колебания. Вторая половина тратится вхолостую. Но с потерями можно мириться — было бы во имя чего. А здесь цель ясна: возникший в генераторе переменный, колеблющийся ток можно направить в антенну, а он создаст вокруг нее электромагнитное поле в виде бегущих во всех направлениях радиоволн.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

III.10

Одним и тем же математическим уравнениям подчиняются колебания тока, возникающие в радиотехническом контуре; волны, бегущие по поверхности озера; вибрации, возникающие под действием воздушных потоков в крыле самолета; колебания маятника и звук.

С точки зрения физики эти явления — разной природы.

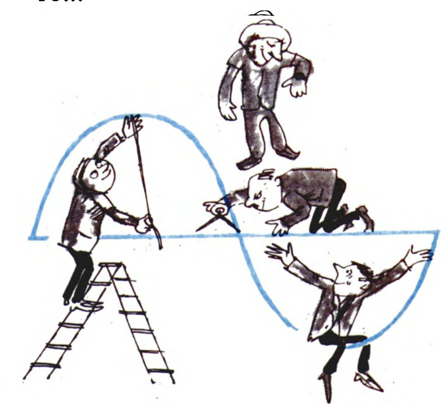
III.11

Но у них есть и общая черта. Она состоит в том, что все они представляют собой периодические синусоидальные колебания и характеризуются тремя величинами: амплитудой, фазой и частотой.

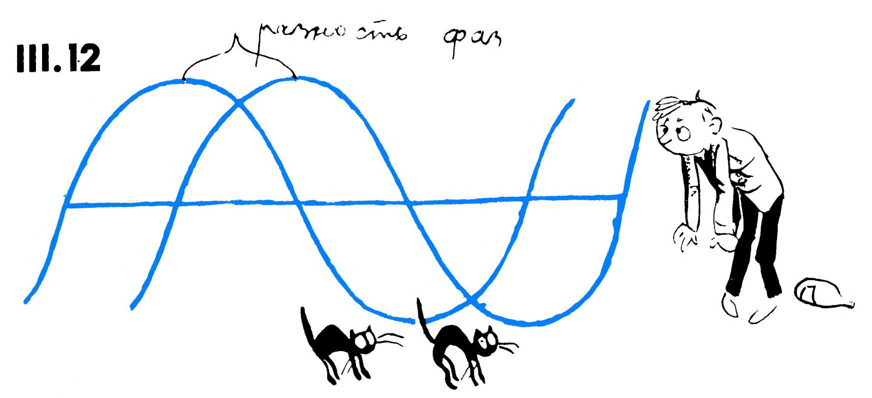
Амплитудой называют наибольшее отклонение от среднего положения (часто среднее положение является нулевым).

Частота — это количество циклов в секунду.

Что же касается фазы, то...



III.12



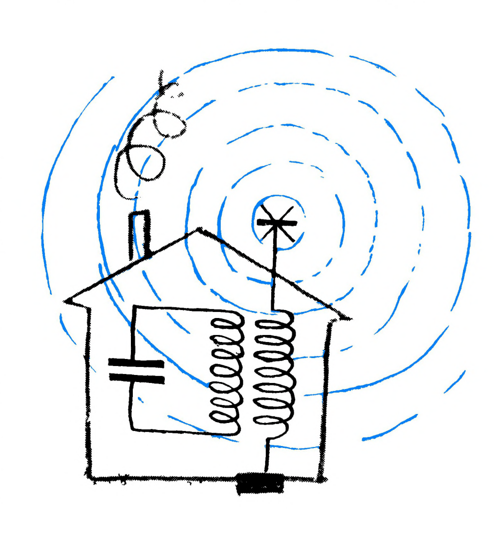
Пока речь идет об одном синусоидальном процессе, о фазе обычно не вспоминают. Зато два колебания, имеющие одинаковые частоты и амплитуды, могут отличаться по фазе. Для сравнения таких колебаний вводят понятие *разности фаз.*

Если фазы двух колебаний неодинаковы, значит гребни двух волн возникают в разное время, а двое качелей проходят крайние и средние положения в разный момент.

Несмотря на то, что частота колебаний у них одинакова, они будут двигаться то вдогонку, то навстречу друг другу, потому что между их колебаниями есть разность фаз.

Так же ведут себя переменные токи, возникающие от двух источников переменного напряжения с определенной разностью фаз.

III.13



Если антенна связана с контуром, в котором происходят электрические колебания, движение электронов в антенне подобно морскому прибою: в такт с колебаниями контура в антенне чередуются «прилив» и отлив».

С каждым «приливом» возрастает интенсивность окружающего антенну электромагнитного поля — образуется гребень волны.

III.14

Спустя время T, равное одному периоду колебаний контура, «прилив» повторится: возникнет еще один гребень. А предыдущий гребень убежит в это время от антенны со скоростью света C и за время T успевает уйти от нее на расстояние $C \cdot T$.

Итак, один гребень еще только возник в антенне, а предыдущий уже находится на расстоянии $C \cdot T$. Длина волны λ и есть расстояние между соседними гребнями: $\lambda = C \cdot T$.

III.15

Чем реже повторяются приливы в антенне, тем дальше успеет уйти один гребень прежде, чем образуется второй. Другими словами: *чем меньше частота колебаний в контуре, тем длиннее излучаемая волна.*

Эту зависимость нам придется вспоминать очень часто. Чтобы лучше ее усвоить, обратимся к примеру: частота океанской качки будет тем меньше, чем длиннее волна.

$$\lambda = C \times T$$



III.16

Точную зависимость между длиной волны λ и частотой колебаний F нам помогут установить бегуны.

Если известно, что бегун делает n шагов в течение каждой секунды, а длина каждого шага равна l, подсчитать его скорость V совершенно нетрудно: надо умножить длину каждого шага на число сделанных за секунду шагов.

Итак: $V = l \cdot n$.

«Шагом» электромагнитных волн является их длина λ.

Число «шагов» — это число периодов (циклов) в секунду F.

Скорость движения волн тоже известна — она равна скорости света C.

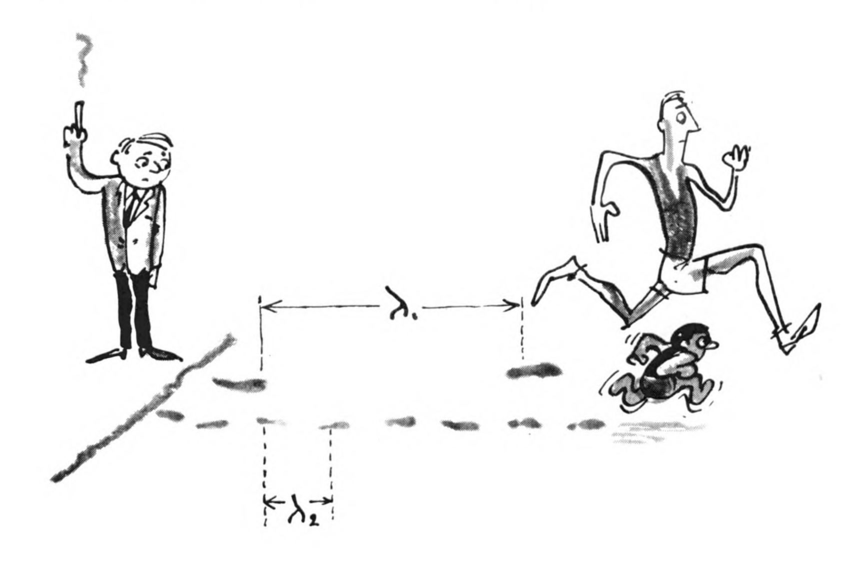
Так же как для бегуна, скорость определяется перемножением длины каждого «шага» на число «шагов» за секунду:

$$C = \lambda \cdot F.$$

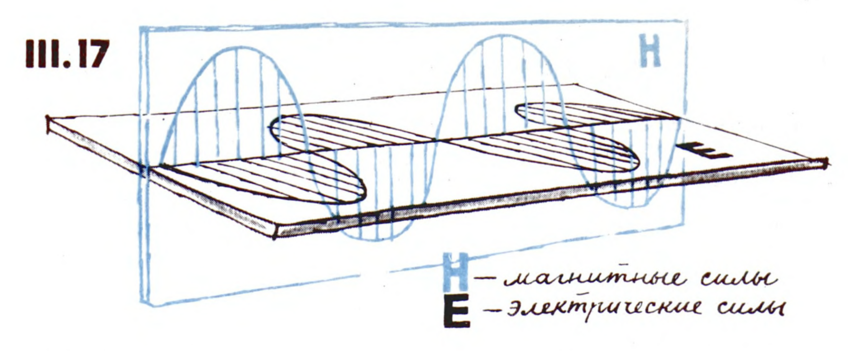
По этой формуле можно определить частоту колебаний, если известна длина волны: $F = \frac{C}{\lambda}$.

Чтобы лучше усвоить эту зависимость, стоит еше раз взглянуть на бегунов. Они бегут с одинаковой скоростью, несмотря на то, что шаги у маленького короче, а у большого — длинней. Зато маленький успевает в течение каждой секунды сделать больше шагов.

Так же и с волнами: чем короче волны, тем больше их частота. А скорость распространения волн одинакова, она не зависит от их длины: 300 000 километров в секунду.



III.17

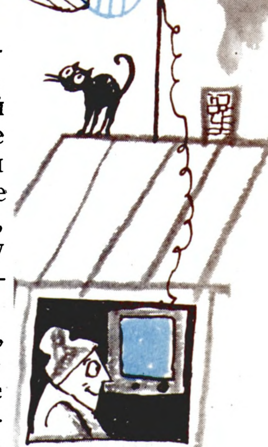


В таком вот виде впервые представил себе электромагнитные волны Джемс Кларк Максвелл. Две синусоиды изображают здесь одновременные колебания неразрывно связанных в пространстве и во времени электрических и магнитных сил.

Эти силы действуют перпендикулярно друг другу, поэтому в условном изображении электромагнитных колебаний синусоиды расположены в двух плоскостях.

Преодолевая дальние расстояния, волна становится все слабее, но сколько бы в ней ни осталось энергии, между двумя ее равноправными составляющими она делится пополам.

III.18



Волны, используемые телевидением, выглядят так, как показано на рисунке III. 17. Магнитные силы действуют в вертикальной плоскости. Под действием волн в антенне приемника возникнут *токи индукции* в том случае, если магнитные силы пересекают ее поперек. (Кто забыл, что такое индукция, пусть посмотрит на рисунок II.18.) Поэтому антенны телевизоров всегда стоят параллельно крышам домов.

В волнах, используемых радиосвязью, электрические и магнитные силы как бы поменялись местами (специалист в этом случае скажет: изменилась на 90 градусов плоскость поляризации волн). Потому-то радиоантенна на автомашине всегда стоит вертикально.

Математике все равно

Для математики электромагнитные волны не являются чем-то из ряда вон выходящим. Для нее это явление — только частный случай из множества, одна из форм колебаний, происходящих в природе на каждом шагу. Она исследует колебания, отвлекаясь от их конкретной природы. Для нее все равно, что колеблется: струна, вода, маятник, воздух или электрические и магнитные силы, связанные воедино в электромагнитных волнах.

Все эти явления она описывает с помощью одинаковых формул и одних и тех же кривых.

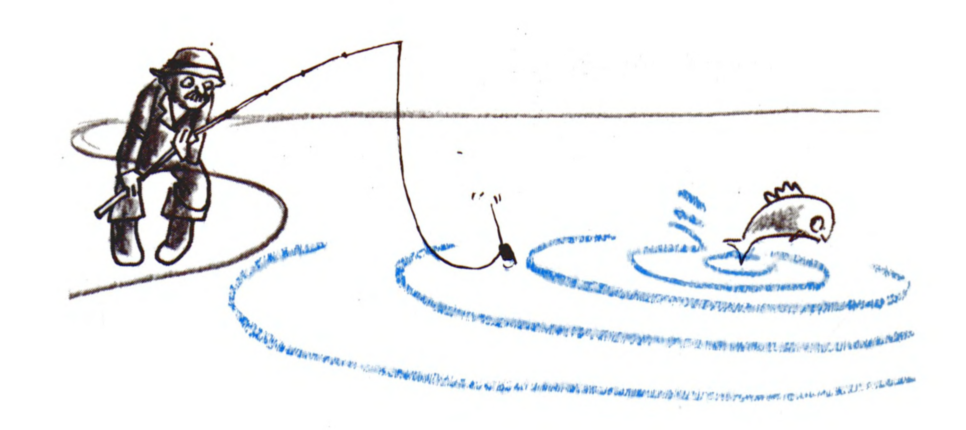
И нам нет нужды сразу рассматривать неощутимые радиоволны. Лучше начать с хорошо знакомых нам волн на поверхности воды.

Представьте себе такую картину. Вы сидите у озера с удочкой и наблюдаете за поплавком. На озере тихо, и поплавок неподвижен. Но вот, блеснув чешуей на солнце, рядом плюхнулась в воду большая рыба. Круги бегут по поверхности озера, и, когда первый гребень достигнет поплавка, он запрыгает вверх и вниз.

Момент волнующий. Кажется, что поплавок вот-вот нырнет под воду. Но нет, волны становятся все слабее, и, наконец, поплавок снова замер на неподвижной глади. А вас охватила досада: нет, не клюет.

Почти все, что было рассказано, отражено на таком вот графике. Здесь учтены и поплавок и рыба. Не учтены, пожалуй, только переживания рыбака.





Точка *А* — это момент падения рыбы. Спустя некоторое время гребень первой волны достиг поплавка (точка *Б*). Гребни и впадины следуют друг за другом, заставляя «танцевать» поплавок (точки *Б, В, Г, Д*). Но постепенно они становятся все слабее и в конце концов исчезают совсем (точка *М*).

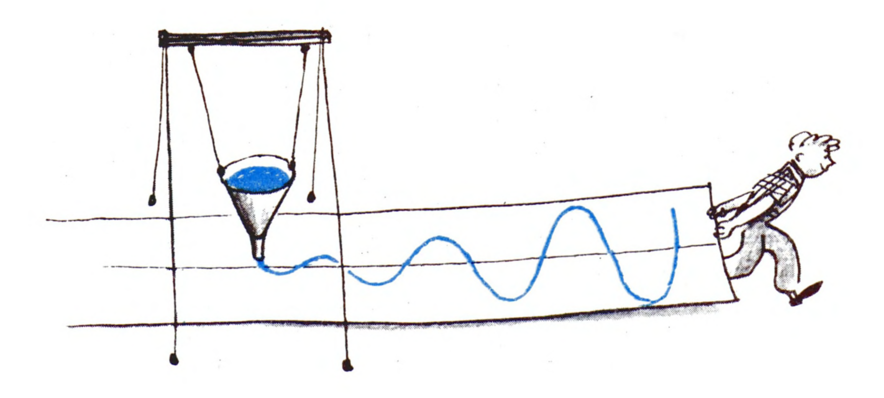
Так выглядит изображенный на графике *процесс затухающих* колебаний (стр. 114).

Если рука музыканта прикоснется к струне, каждая ее точка будет вести себя так же, как поплавок. Кривая, которую мы только что рассмотрели, может с тем же успехом применяться и здесь. Но масштаб ее будет иным, потому что колебания струн отличаются от колебаний поверхности озера *амплитудой* и *частотой* (см. III. 11).

Амплитуда — это наибольшее отклонение от среднего положения какой-то точки струны или «танцующего» поплавка. На нашем графике каждое следующее колебание имеет меньшую амплитуду, потому что мы рассматриваем затухающий процесс.

Теперь нам придется еще раз вспомнить о колебательном контуре, в котором от электрического толчка возникают колебания с уменьшающейся амплитудой и с собственной частотой. Еще одна приятная неожиданность: процесс, возникающий в колебательном контуре, можно описывать той же самой кривой!

Если хотите, ту же кривую вам нарисуют качели. После толчка амплитуда качелей будет с каждым взмахом становиться все меньше, и они дадут нам кривую, очень похожую на кривые контура и поплавка. А можно сделать так, чтобы колебания не затухали и амплитуда оставалась постоянной?

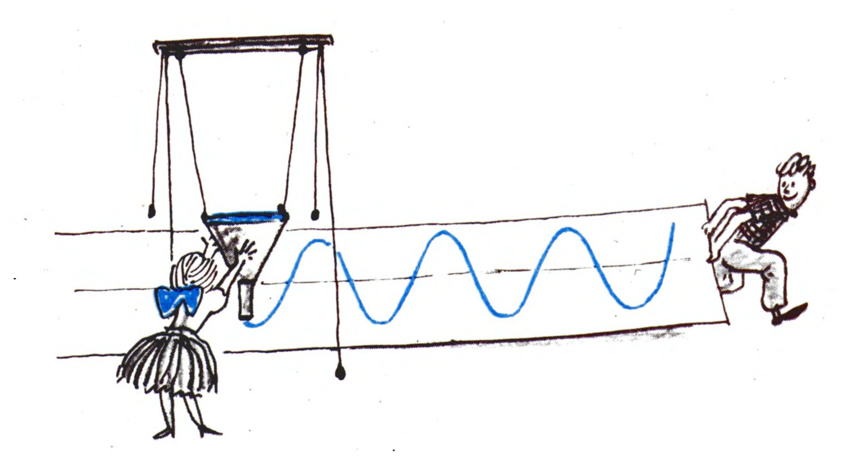


Конечно. Для этого надо иметь внешний источник энергии, дающий толчки в такт с собственной частотой качающегося (колеблющегося) тела.

Для качелей вопрос решается просто: к участникам описанных выше событий добавлен еще один персонаж. Если он будет все время толкать качели с одинаковой силой, то их движение будет изображаться незатухающей синусоидальной кривой.

В радиотехнике роль этого персонажа берет на себя триод. Процесс колебаний, возникающих в генераторе, — это тоже синусоидальный процесс. Качели движутся то влево, то вправо. Точно так же в каждом периоде колебаний изменяет направление ток.

Так удается явления самой различной природы свести к одним и тем же кривым.



На помощь слабому голосу

Антенна, подключенная к контуру генератора, подобна упавшей в озеро рыбе: от нее во все стороны бегут круги невидимых радиоволн (см. III.13).

А поплавком, который будет качаться на волнах, служит другая антенна, антенна приемника: набегающие радиоволны наведут в ней по законам индукции переменный электрический ток. Волны, идущие от передающей антенны к приемной, могут нести на себе звуки музыки, речь, телевизионные кадры, азбуку Морзе или другой импульсный код. Так радиоволны связали незримыми, но прочными нитями всех, кто живет сейчас на земле.

До тех пор, пока не были созданы радиоволны, человеческий голос был чрезвычайно слаб. Крик можно услышать, находясь на расстоянии одного километра, да и то при условии, что он не утонет в посторонних шумах. Не удивительно: ведь и громкий рокот моторов с помощью звукоулавливателей удается услышать не дальше чем километров за десять.

Зато «верхом на радиоволнах» даже произнесенное шепотом слово облетает весь земной шар.

Почему? Да потому что радиоволны слабеют на пути от передатчика к приемнику не так интенсивно, как звуковая волна.

А кроме того, с помощью электроники эти волны можно усилить.

Звуковая волна — это упругие колебания воздуха. Струна определенной длины издает звук чистого тона. Мимо человека, сидящего в зрительном зале, через равные интервалы времени пробегают уплотненные слои воздуха — гребни волны. Если мимо слушателя пробегает 100 гребней в секунду, значит частота звуковых колебаний составляет 100 герц*. Кстати, ухо воспринимает звуки, частота которых лежит в пределах от 16 до 16 000 герц. Люди с особо развитым слухом могут улавливать высокие звуки с частотой до 40 000 герц.

Чтобы оценить энергию рожденного голосом звука, можно привести такой наглядный пример. Энергия голосов 100 тысяч людей, говорящих одновременно, не превышает энергии, потребляемой лампочкой карманного фонаря. А одновременная

---

* Единицы, введенные для оценки частоты радиоволн, полученных Герцем, теперь успешно используются для характеристики любых видов колебаний и волн, в том числе и звуковых.



беседа всех живущих на земном шаре людей порождает не больше энергии, чем двигатель автомобиля «Москвич».

Не обладая большой энергией, звуки, изданные голосом или музыкальными инструментами, вязнут в упругом воздухе и замирают.

С помощью звуковых резонаторов звук можно усилить всего лишь в несколько раз. А радиосигналы в современных приемниках могут быть усилены в 10^{14}—10^{17} раз (то есть в 100 триллионов — 100 квадрильонов раз!).

И еще один недостаток звуковой связи по сравнению с радиосвязью: звук, рожденный в Москве, достиг бы Дели или Нью-Йорка лишь спустя много часов.

Чтобы сэкономить время и силы в дальней дороге, человек стремится прибегнуть к помощи транспорта.

Радиоволны служат для звука весьма удобным транспортом. Скорость железнодорожного экспресса не идет ни в какое с ним сравнение: в течение каждой секунды радиоволна обежит земной шар по экватору почти восемь раз!

Электроны и звук

Чтобы передать звуки по радио, необходимо прежде всего превратить звуковые волны в переменный электрический ток. Это делают микрофоны.

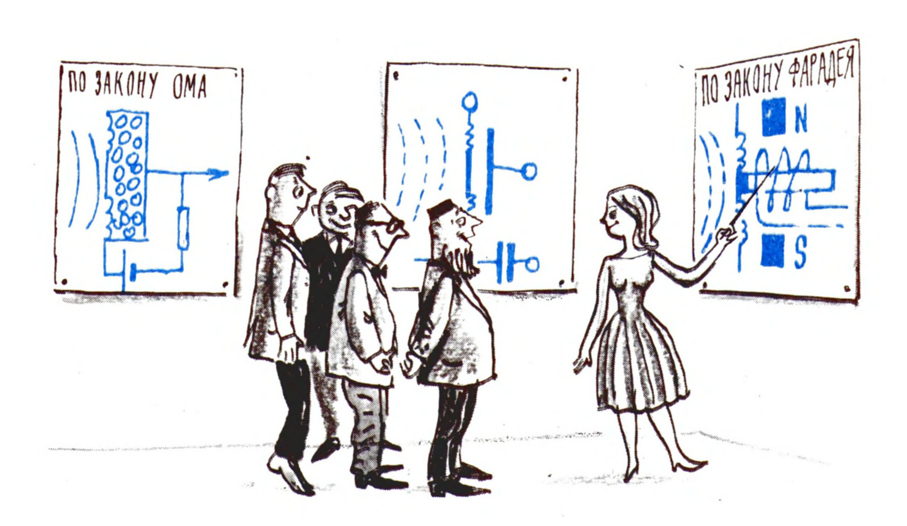
Микрофон — устройство несложное, но если когда-нибудь будет создан музей электроники, один из залов его по праву займет микрофон.

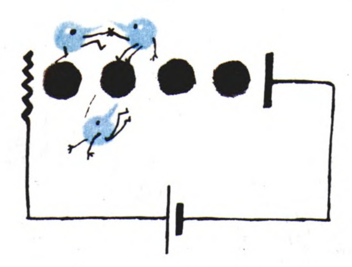
На его примере посетитель увидит, как можно использовать для одной практической цели различные физические явления, изученные и исследованные в разных странах и в разные времена.



Вот микрофон, в котором использован открытый Омом и носящий его имя закон.

Мембрана вибрирует под действием звуковых колебаний. Когда давление на нее станет сильнее, а это случается в момент прихода гребня волны, она сильнее сожмет расположенный рядом с нею слой угольного порошка. Частицы плотнее соприкоснутся друг с другом и будут легко пропускать электрический ток. В этот момент ток возрастет. Сколько раз придут на мембрану гребни и впадины, столько раз будет увеличиваться и уменьшаться электрический ток в цепи.





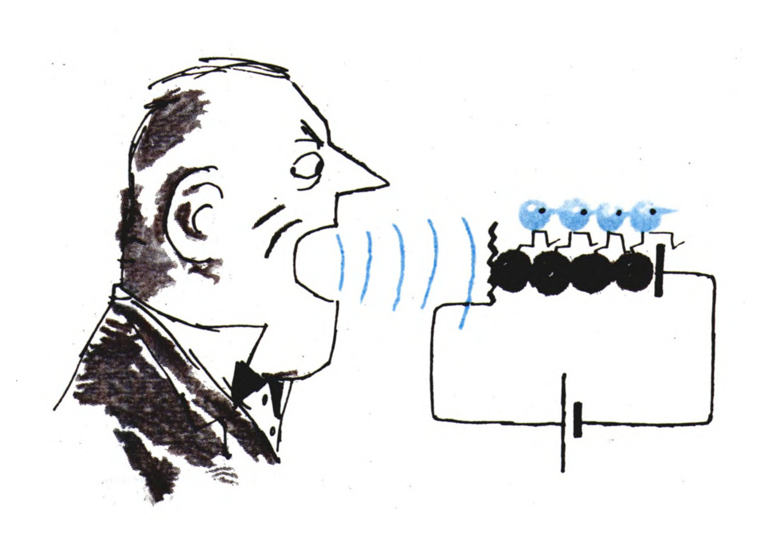
При неизменной высоте звука ток будет меняться по синусоиде со звуковой частотой.

Не зря математика ко всем колебаниям подошла с одинаковой меркой: можно и в самом деле перейти от одного колебательного процесса к другому, сохранив свойства самих колебаний — их амплитуду и частоту.

А вот другой тип микрофона. Здесь используются законы индукции, которые открыл Фарадей. Мембрана заставляет качаться катушку. Катушка находится в поле магнита. При пересечении силовых линий магнита в обмотках катушки индуцируется ток. Частота его равна частоте колебаний мембраны. Амплитуда тем больше, чем сильнее качает мембрану звуковая волна.

А есть микрофоны, у которых под воздействием звука изменяется емкость. А вместе с емкостью опять-таки меняется ток.

Как видите, способов много, а результат один: звук порождает колебания тока соответствующей частоты.





ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

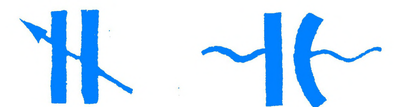
III.19

Что произойдет на улицах города, если убрать все знаки уличного движения? Представить себе нетрудно: каждый уличный перекресток станет местом нескончаемых катастроф.

Оказывается, в любой электронной схеме, осуществляющей усиление переменных сигналов, тоже есть опасные перекрестки. Вместо знаков уличного движения на таких перекрестках стоят конденсаторы.

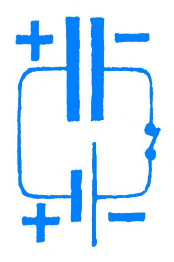
Управляя движением электронов, они помогают избежать катастроф.





III.20

Конденсатор — устройство несложное. В простейшем случае он состоит из двух параллельных пластин, разделенных воздушной прослойкой. Всем известно, что холодное стекло конденсирует на поверх-

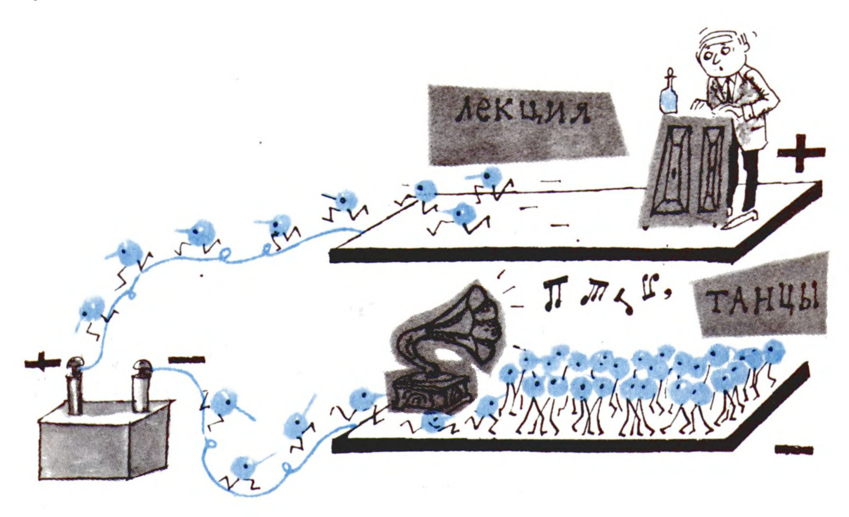


ности капельки влаги. Электрический конденсатор, подключенный к источнику напряжения, конденсирует на своих пластинах заряд. Потому его и используют в качестве «резервуара» при управлении электронным лучом.

При подключении источника постоянного напряжения на одной из пластин конденсатора образуется скопление электронов — возникает отрицательный потенциал.

Со второй пластины электроны уходят по внешнему проводу. Потенциал этой пластины будет положительным.

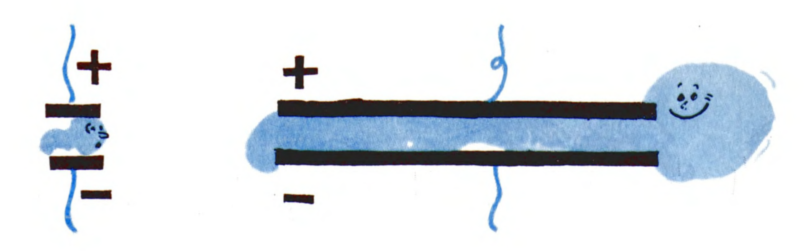
Конденсатор будет заряжен полностью, когда разность потенциалов между его пластинами станет равной напряжению той батареи, к которой он подключен.



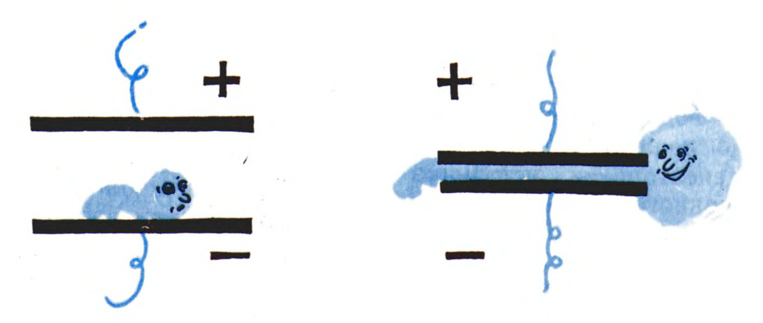
III.21

Величина накопленного конденсатором заряда зависит от емкости конденсатора. Емкость будет тем больше, чем больше площадь пластин.

Емкость увеличится также в том случае, если при-

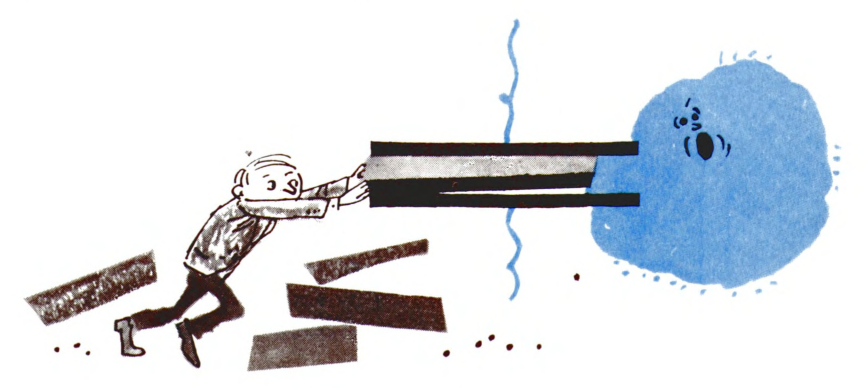


близить пластины друг к другу. Однако в этом случае возникает опасность пробоя: при большом напряжении между расположенными близко пластинами проскакивает электрическая искра.



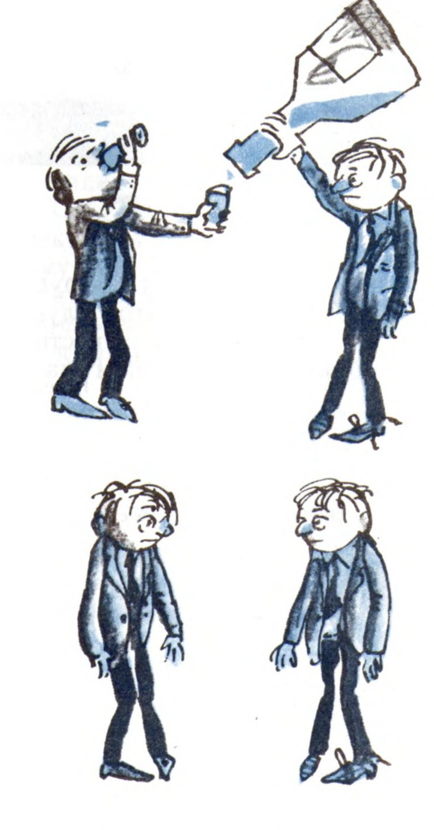
III.22

Не меняя геометрических размеров конденсатора, можно во много раз увеличить емкость, применив в качестве изолятора, разделяющего пластины, специальные материалы: слюду, керамику, полистирол.



III.23



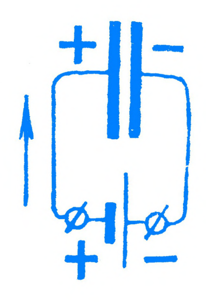


В цепи, состоящей из конденсатора и источника постоянного напряжения, ток течет лишь до тех пор, пока длится заряд. Когда напряжение на конденсаторе становится равным напряжению источника, ток в цепи прекращается.

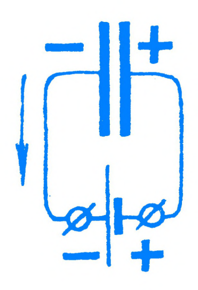


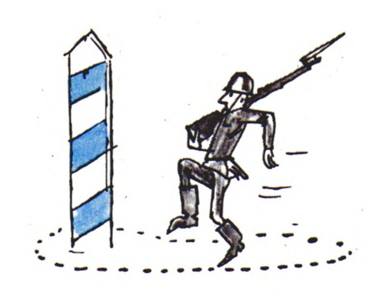
III.24

Если в той же цепи поменять местами полюса источника напряжения, произойдет перезаряд. Ток будет течь в обратную сторону до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не







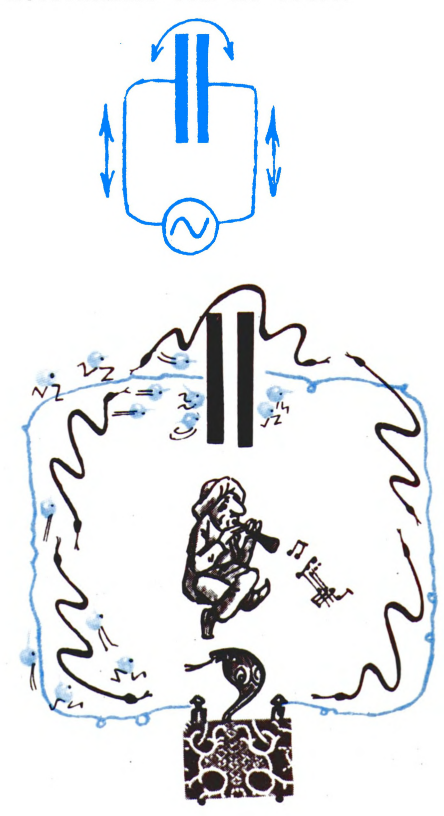


сравняется с напряжением источника, причем на этот раз каждая из пластин конденсатора приобретает противоположный по знаку заряд.

III. 25

Если конденсатор подключен к источнику переменного напряжения, изменяющегося, например, 1000 раз в секунду, значит 1000 раз в секунду будут меняться знаки зарядов на пластинах и 1000 раз в секунду будет изменять свое направление ток во внешней цепи. А поскольку ток в цепи при этом не прекращается, считают, что конденсатор «пропускает» переменные токи, хотя на самом деле через конденсатор ток не течет. Ни один электрон не проходит через слой изолятора, разделяющего пластины. Электроны движутся только во внешней цепи.

При постоянном токе совсем иная картина. Конденсатор зарядится однажды, и после этого ток прекратится, так как преодолеть пространство между пластинами не способен ни один электрон. По цепи, в которую включен конденсатор, постоянный ток не течет.



III.26

Эту особенность конденсатора электроника использует на каждом шагу. Конденсатор $C_р$ ставят «на перекрестке» путей постоянного и переменного токов между анодом одной лампы и сеткой другой. Такой конденсатор называется разделительным: его назначение заключается в том, чтобы разделить постоянный и переменный токи.

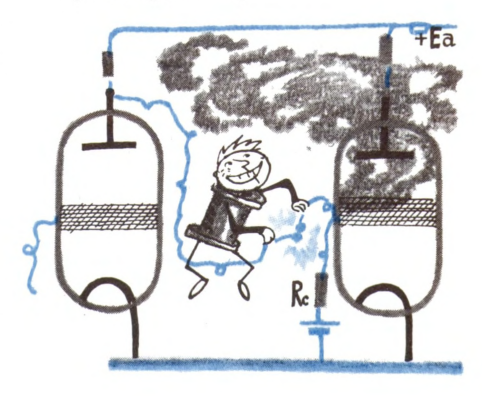
Открывая переменному току путь от анода к сетке следующей лампы, он в то же время не пропускает к ней постоянный ток.

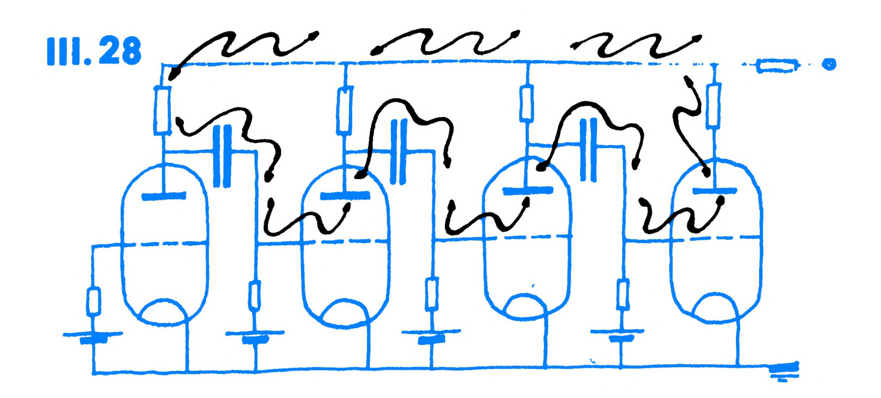


III.27

Стоит лишь замкнуться пластинам этого конденсатора (например, при пробое), как неминуемо произойдет катастрофа: высокий потенциал анода создаст большой ток через сопротивление сетки ($R_с$). Потенциал сетки станет равным потенциалу анода, и сетка сгорит.

Нормально работающий конденсатор пропускает лишь переменные токи. Поэтому он свободно пропустит на сетку усиливаемые сигналы, а постоянному току закроет путь.

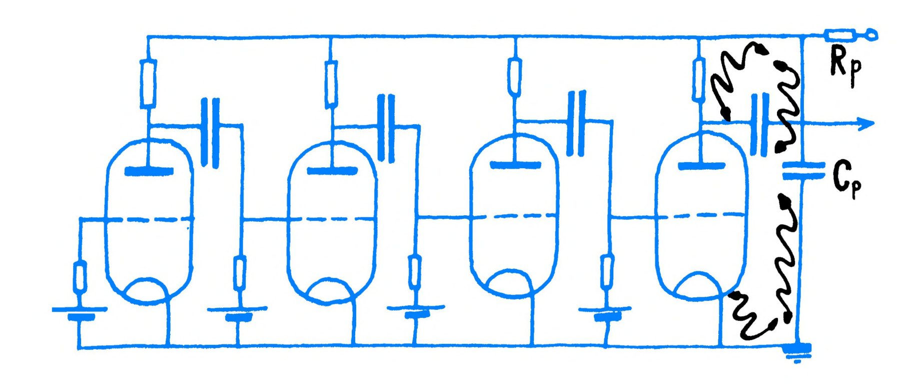




Другой вид катастрофы происходит, если переменные токи свободно текут от анода к источнику анодного напряжения. С последних каскадов сильный сигнал может возвратиться через общий источник питания к первым каскадам, и тогда в усилителе возникнет паразитная обратная связь. Такой усилитель не сможет усиливать приходящих сигналов, а начнет генерировать собственную частоту.

Избежать катастрофы опять помогает конденсатор C_p.

Для переменных токов он представляет очень малое сопротивление, и если анодную цепь лампы соединить через конденсатор с землей, то переменная составляющая анодного тока легко пройдет через конденсатор на землю и не попадет в общий источник питания через сопротивление развязки R_p.



Слишком длинные волны

Как работает радиостанция? Кажется, нам теперь все известно, и мы легко ответим на этот вопрос. Но...

Микрофон превращает звук в изменение тока. Переменный ток, подведенный к передающей антенне, излучится в пространстве в виде радиоволн. Радиоволны наведут токи в приемной антенне. Их можно усилить с помощью электронных ламп. Энергия усиленного тока заставит вибрировать диффузор громкоговорителя. Чего же еще не хватает?

А не хватает, пожалуй, главного. Звена, без которого нельзя все остальные звенья связать в единую цепь.

«...Говорит Москва. Прослушайте скрипичный концерт в исполнении...»

Вслед за голосом диктора (частота звуковых колебаний его составляет 80—8000 колебаний в секунду) раздались звуки скрипки с частотой до 16 000 колебаний в секунду, то есть до 16 килогерц *.

А приемник все время настроен на одну частоту. На какую же? На 80, на 8000 или на 16 000 герц? Почему с изменением частоты звуковых колебаний не надо менять настройку приемника?

Мы только что видели, как звук превращается в колебания тока, причем частота колебаний его равна звуковой частоте. Разве не этот ток порождает волны вокруг антенны? Разве не эти волны должен ловить приемник, чтобы вновь превращать их в звук?

Если бы можно было излучать в пространство звуковые частоты, вопрос и в самом деле был бы решен. Можно было бы усиливать ток, возникающий в цепи микрофона, и направлять его в антенну для создания радиоволн.

Но вот беда: антенна может излучить волны в пространство только в том случае, если размер ее соизмерим с длиной излучаемых волн.

Предположим, что звук преобразован в колебания тока, ток направлен в антенну, антенна излучает волну. Зная скорость, с которой движутся электромагнитные волны, и частоту колебаний тока в антенне, легко подсчитать длину излучаемых волн (см. III.16).

Звук создает колебания тока с частотой от 16 до 16 000 герц. Для 16 000 герц длина электромагнитной волны

---

* 1000 герц составляют 1 килогерц, 1000 килогерц — 1 мегагерц. Этими единицами мы будем пользоваться и в дальнейшем.

окажется близкой к 19 километрам. Следовательно, чтобы передавать такие волны, пришлось бы снабдить передающую станцию антенной длиной в несколько километров.

А мы еще не принимали во внимание самые низкие частоты звука, которым соответствуют радиоволны длиной, измеряемой десятками тысяч километров!

Но если бы даже и удалось создать такие циклопические антенны, вопрос все равно не был бы решен. Представьте себе, что все радиостанции излучают одновременно звуковые частоты в диапазоне от 16 до 16 000 герц. И ваш приемник настроен на эти же частоты. Вместо одной радиопередачи вы услышите одновременно все мелодии и все голоса!

К счастью, придуман другой способ радиосвязи. Этот способ позволяет настроить приемник на одну из множества станций и избавляет технику связи от гигантских антенн.

Передачи ведутся на *несущей волне.*

Экспресс-невидимка

Для передачи звука на расстояние с помощью радиовещательных станций электроника формирует специальные волны длиной от 15 до 2000 метров, которым соответствуют частоты от 20 000 000 до 150 000 герц (то есть от 20 мегагерц до 150 килогерц).

Эти частоты слишком малы по сравнению, скажем, с частотой световых колебаний: частота световых волн измеряется миллиардами мегагерц! В то же время они чересчур велики для того, чтобы можно было воспринимать их как слышимый звук. Зато именно эти неощутимые волны, которых нельзя ни видеть, ни слышать, служат отличным «экспрессом», проносящим через все расстояния музыку или речь.

Прежде чем «отправиться в путешествие», звук, превращенный с помощью микрофона в электрический ток, колеблющийся с низкими (звуковыми) частотами, «садится верхом» на упомянутые нами сигналы высоких частот. Их и называют поэтому несущими. И в самом деле, они несут преобразованный звук сначала в антенну, а затем, превратившись в электромагнитные волны, проносят его через пространство и доставляют к приемникам, настроенным на ту же волну.

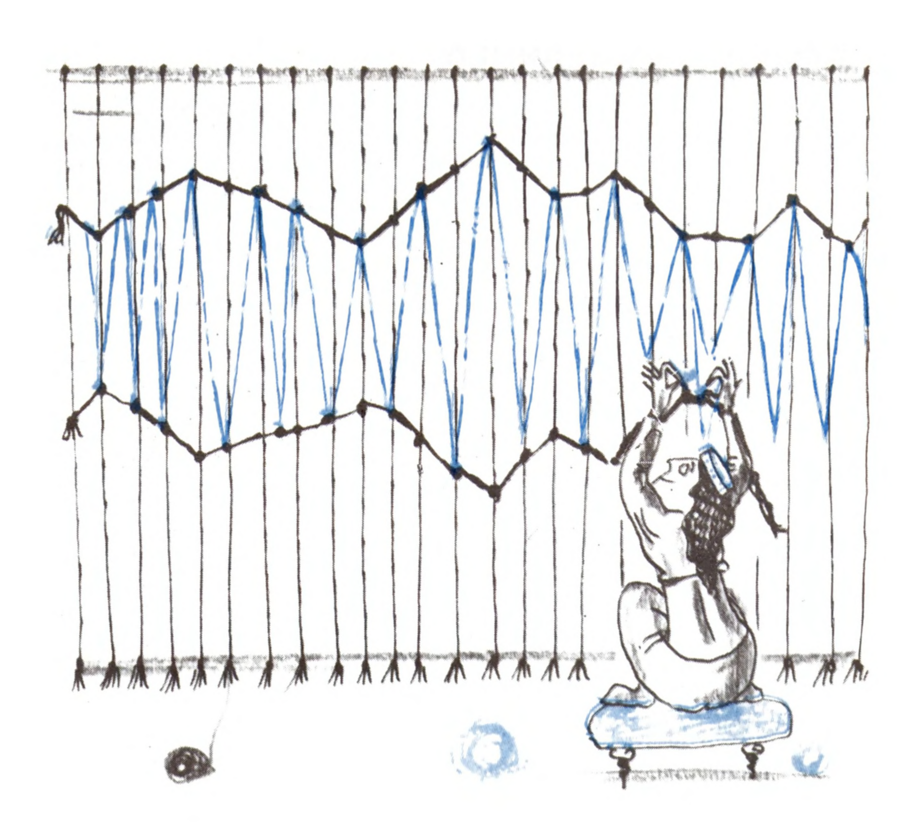
Строго говоря, звук при этом передается «кусочками» — на гребнях несущей волны. Но гребни сменяют друг друга так часто, что заметить разрывы в «узоре» не способен даже очень чувствительный к малым отрезкам времени электриче-

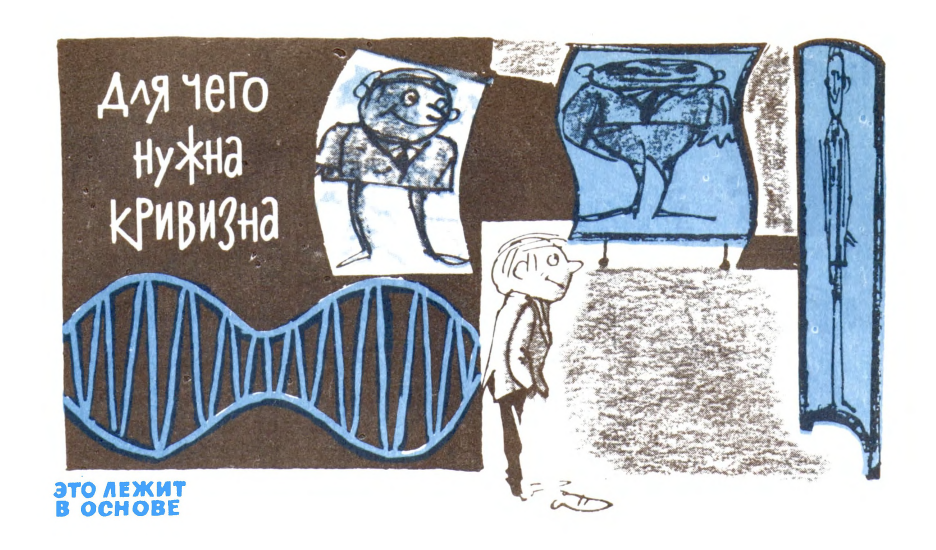
ский прибор. Точно так же, любуясь вышитым или вытканным на ковре сложным узором, вы не заметите, что он состоит из узелков или крестов.

Но для этого необходимо, чтобы канва не была слишком грубой. По той же причине частота несущих сигналов должна быть во много раз выше любой из содержащихся в звуке частот. Потому для звука, обладающего частотой не выше 16 000 колебаний в секунду, выбираются несущие сигналы с частотой не менее 150 000 герц.

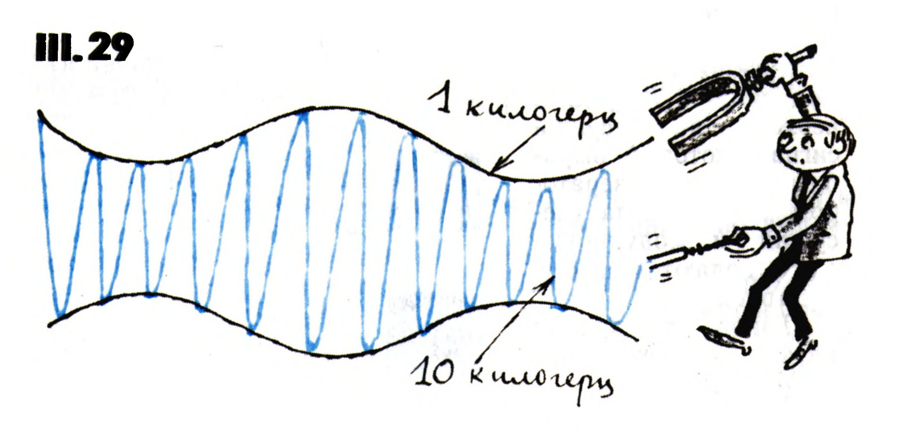
Но как удается совместить одни сигналы с другими, усадить звуковые частоты верхом на несущий сигнал?

Мы, наверное, уже начали привыкать к мысли, что всякий раз, когда электроника сталкивается с трудной задачей, ее выручает триод.





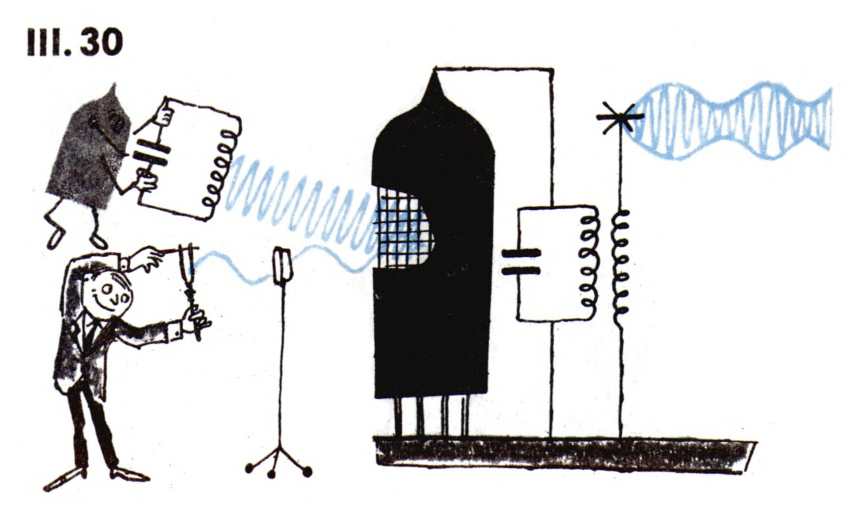
III.29



У затухающих колебаний амплитуда со временем уменьшается (см. III.5). Непрерывные колебания имеют постоянную амплитуду.

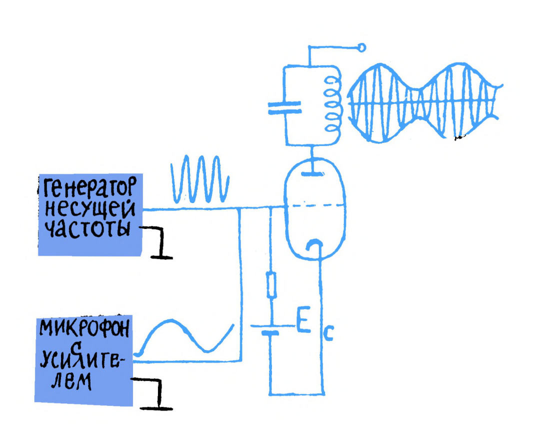
А можно создать электрические колебания, амплитуда которых будет меняться по синусоиде. Если частота колебаний составляет 10 килогерц, а их амплитуда меняется с частотой 1 килогерц, то говорят, что сигнал частоты 10 килогерц промодулирован по амплитуде с частотой 1 килогерц.

III.30



Полученный с микрофона электрический сигнал звуковой частоты можно с помощью модуляции «усадить верхо́м» на несущий сигнал, который вырабатывается генератором. Оба сигнала (несущий и модулирующий) подаются на сетку триода.

Триод в данном случае играет роль *модулятора*.

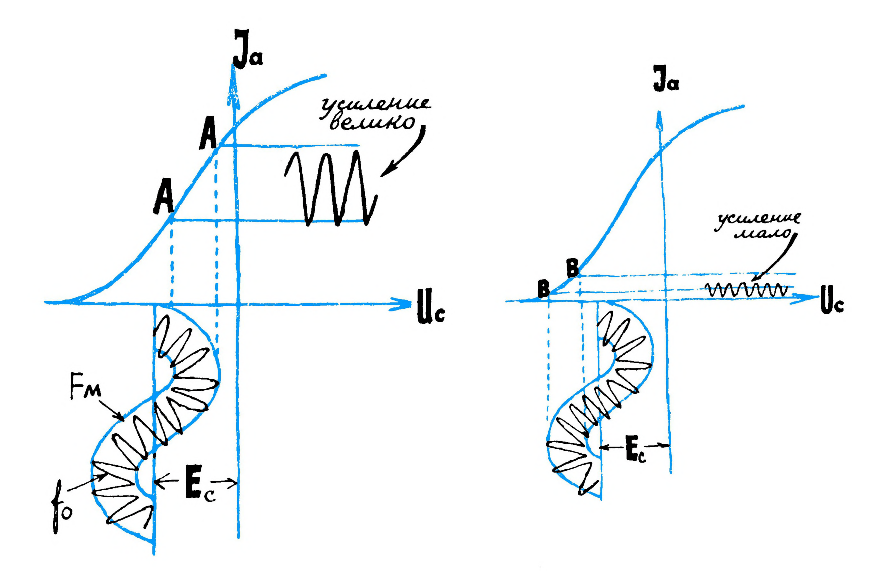


III.31

Чтобы понять процесс модуляции, придется вспомнить о характеристике триода (см. I.31 — I.34).

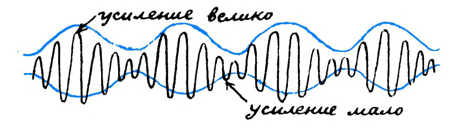
На сетку триода подано два переменных сигнала: несущий, с частотой f_0, и модулирующий, с более низкой частотой $F_м$. В какой-то момент времени сумма всех напряжений на сетке (постоянного от сеточной батареи E_c и двух переменных с частотами f_0 и $F_м$) оказалась такой, что сигналы действуют на участке AA.

В другой момент времени те же сигналы будут



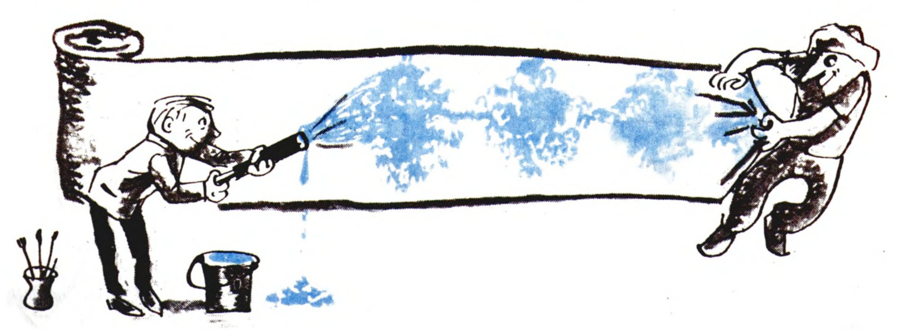
действовать на участке *ВВ*. На этом участке колебания усиливаются меньше, так как характеристика лампы на этом участке обладает значительной «кривизной».

Модулирующий сигнал «скользит» по характеристике с частотой $F_м$. Значит, с такой же частотой меняется усиление. В результате несущий сигнал изменяется по амплитуде с частотой $F_м$. Не будь «кривизны», усиление было бы постоянным и



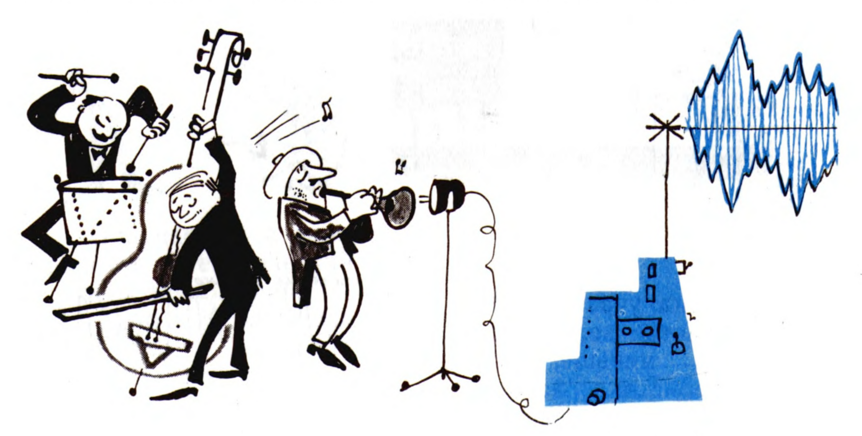
нельзя было бы получить модулированный по амплитуде сигнал.

Постоянное напряжение на сетке E_c специально подбирается так, чтобы попасть на участок характеристики, обладающий кривизной, то есть на нелинейный участок характеристики.



III. 32

Мы рассмотрели процесс модуляции простым синусоидальным сигналом. При передаче музыки или речи с микрофона приходит более сложный сигнал. Но суть процесса остается той же: за счет «кривизны» меняется усиление, и на несущий сигнал, который служит своеобразной канвой, накладывается узор. В этом узоре содержится голос диктора, ария или музыкальный этюд.

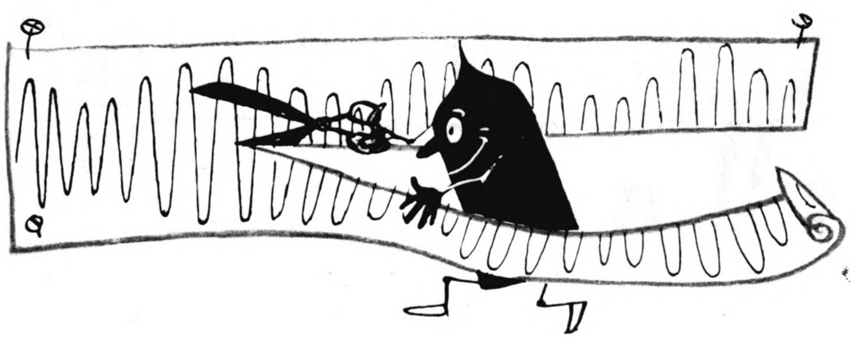


III. 33

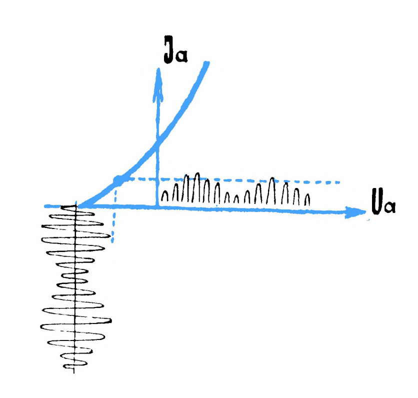
В приемнике амплитудно-модулированный сигнал вновь подвергается изменениям. С ним проделывают операцию, обратную модуляции: узор отделяется от канвы. Без этого нельзя превратить колебания электрического сигнала в звуковые колебания, так как диффузор динамика слишком неповоротлив и инертен, чтобы реагировать на колебания с частотой f_0.

Чтобы привести динамик в движение, надо подать на него чистый узор.

III. 34



Узор вырезают с помощью своеобразных ножниц, которые называют детектором. Главной деталью ножниц служит диод. Диод справляется с этой ролью опять-таки лишь потому, что в его характеристике есть участок, обладающий кривизной. На этом участке часть сигнала будет «отрезана», а оставшаяся часть подана на цепочку *RC*.

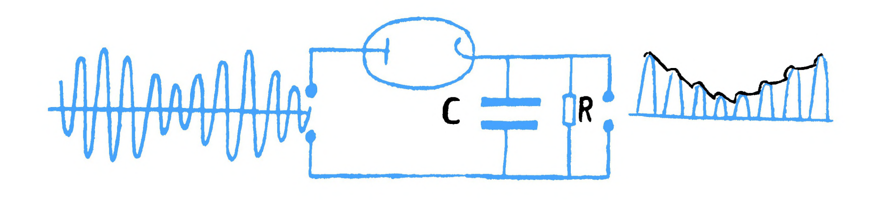


III. 35

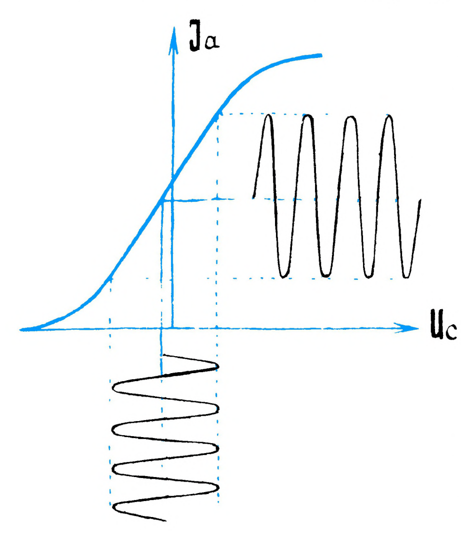
Отрицательные полупериоды диод «отрезает». Во время же положительных полупериодов через него проходит ток. Ток этот течет «всплесками» и создает частокол пичков. Первый пичок тока зарядит конденсатор, затем наступает пауза, которая длится до тех пор, пока не возникнет следующий пичок. За время паузы конденсатор разряжается мало: справа не дает разряжаться большое сопротивление, слева — закрытый диод.

Напряжение на конденсаторе сохраняется почти неизменным до тех пор, пока не появится следующий пичок.

Если пички имеют разную амплитуду, то конденсатор каждым пичком будет заряжаться по-разному, и в результате на нем выделится чистый узор.



Искаженный портрет



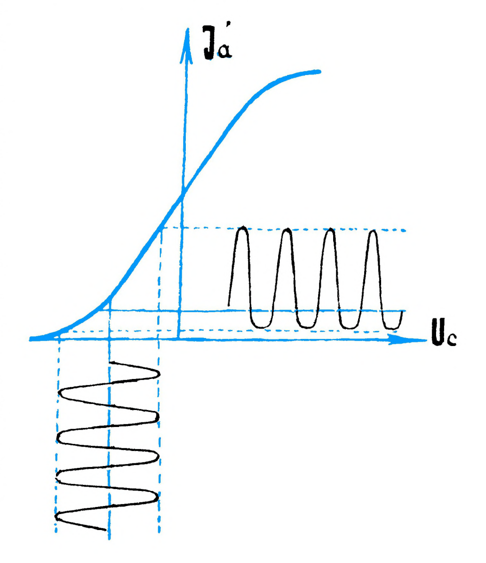
Чтобы усилить сигналы без искажений, необходимо попасть на линейный участок характеристики лампы. Стоит нарушить это условие, и вместо ровненькой синусоиды мы получим ее искаженный портрет.

Радиолампа стала подобна кривому зеркалу, установленному в комнате смеха. Увеличивая одну часть изображения и уменьшая другую, кривое зеркало превращает нормальные лица в забавные карикатуры. Ясно, что в обиходе подобные зеркала никому не нужны. А лампы с кривыми участками характеристик?

В том случае, когда лампа должна без искажений усилить сигналы, кривые участки характеристики не могут дать ничего, кроме вреда. Но техника знает немало изобретений, основанных на использовании именно тех свойств и явлений, от которых в других случаях был один только вред.

Вспомним хотя бы о трении. Сколько энергии бесполезно расходует на преодоление вездесущего трения любой механизм! Но не будь трения, не было бы ни валов, ни трансмиссий, ни быстрых автомобилей, несущихся по дорогам благодаря трению шин.

Искры, проскакивающие между подвижными контактами, обжигают эти контакты и воспринимаются чувствительными приборами в виде ненужных помех. Но и эти явления люди смогли обратить на пользу: с помощью искр теперь обрабатывают металл.



Триод может служить еще одним ярким примером того, как в неразрывной диалектической связи явлений одни и те же свойства могут приносить и пользу и вред.

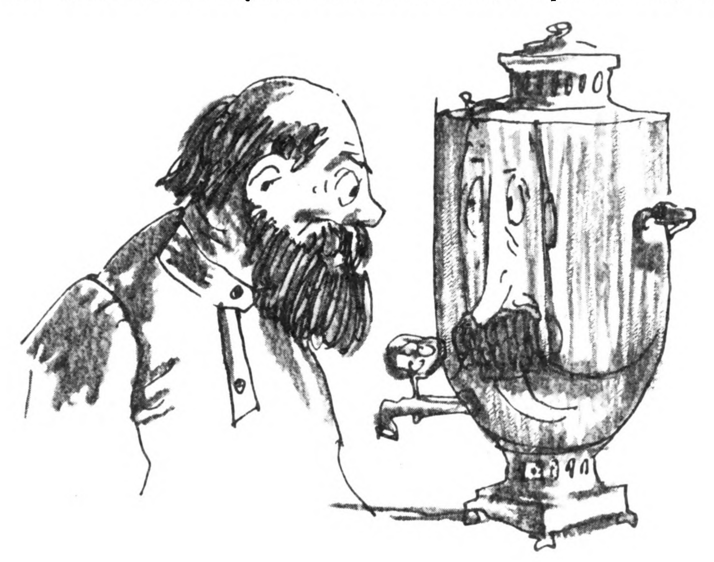
Кривые участки характеристики искажают сигналы при усилении. Но если лишить триод этого «недостатка», он утратит добрую половину достоинств, из-за которых с таким почтением и восхищением отзывался о нем физик Луи де Бройль.

Королевство кривых зеркал

Есть чудесная сказка английского писателя Кэрола — «Алиса в стране чудес». Маленькая Алиса попадает в странное королевство, где вся окружающая действительность отражается в кривых зеркалах. Все уродливое, что встречается в жизни, выглядит здесь весьма привлекательно: жадность оборачивается щедростью, зло прикидывается добром.

У электроники тоже есть свое «королевство», где применяются исключительно искривленные зеркала. Правда, роль они выполняют совсем иную: они призваны не искажать истину, а выявлять.

Кривые зеркала электроники — это нелинейные участки ламповых характеристик. С помощью этих участков удается проделать целый ряд необходимейших операций с сигналами: наложить на несущий сигнал музыку или речь, отделить звуковые частоты от несущих сигналов или, сохранив все, что за-





писано на несущем сигнале, изменить его частоту.

Сигнал, переданный по радио, будет услышан не раньше, чем он пройдет через все «зеркала». Одно из них установлено в передатчике: с его помощью узор наносится на канву. Этот процесс называется модуляцией (см. III.31; III.32).

Канва вместе с узором излучается передающей антенной в виде радиоволн. А антенна приемника принимает их. Правда, в месте приема сигнал слишком слаб. Ну, ничего страшного, его надо просто усилить.

Сначала заботятся о том, чтобы его не исказить — на линейном участке характеристики усиливаются одновременно и узор и канва.

Однако таким способом слабые сигналы нельзя усилить до необходимой величины. Дело в том, что часть энергии усиленного сигнала через общий источник питания, к которому подключены все аноды, неизбежно попадет на вход усилителя. Значит, с анода последней усилительной лампы часть сигнала вернется на сетку первого усилительного каскада, и весь усилитель охватит паразитная обратная связь (см. III.28). А к чему это приводит, мы теперь знаем: благодаря этой связи можно поддерживать в контуре незатухающие колебания, генерировать непрерывный сигнал.

Опять пример диалектики: генератор не может работать без обратной связи, а в усилителе она приносит вред. И хотя, конструируя усилители, инженеры принимают все меры, чтобы преградить путь идущему «обратным ходом» сигналу, все же он неизбежно проникает на вход.



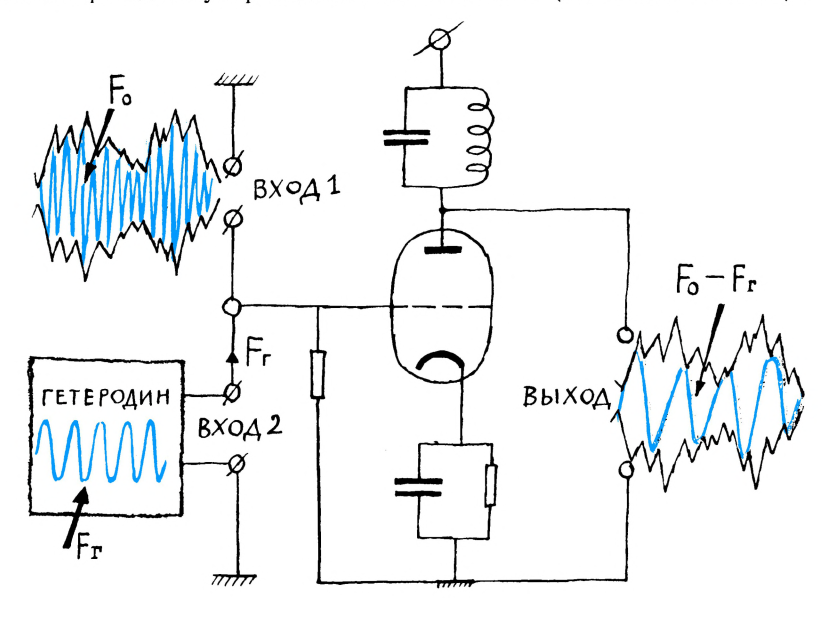
При большом усилении сигнал на выходе усилителя обладает большой энергией. Даже ничтожная доля ее, попав по цепям паразитной обратной связи на вход усилителя, будет снова усилена, и усилитель начнет генерировать колебания собственной частоты. Тогда слабый сигнал, приходящий с антенны, утонет в собственных колебаниях усилителя, и из приемника будет доноситься лишь пронзительный свист.

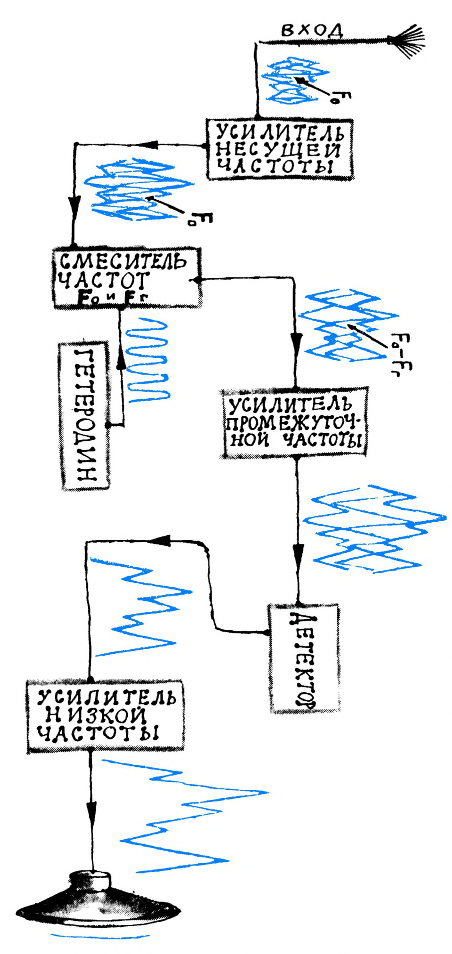


Чтобы избежать подобных явлений, приходится усиливать по этапам. И на каждом этапе применяются «зеркала».

Первый этап — усиление на высоких частотах. Затем — первое «искажение»: переход от высокой к промежуточной частоте. Переход этот осуществляется так. На нелинейную часть характеристики лампы подаются одновременно сигнал, приходящий с антенны, и сигнал внутреннего генератора. Такой генератор называют гетеродином. Несущая частота имеет величину Fo, а гетеродинная — Fг. Емкость и индуктивность контура, включенного в анодную цепь лампы-смесителя, выбраны так, чтобы собственная частота контура была равна разности Fo — Fг. Сигнал разностной частоты выделяется в контуре лампы-смесителя, а на нем по-прежнему сохраняется тот узор, который нес на себе несущий сигнал. «Кривое зеркало» не исказило узора — он просто записан теперь на более редкой канве.

Затем переход ко второму этапу: сигнал усиливается на промежуточной частоте. Снова «кривое зеркало» — лампа-детектор. Здесь узор отделяется от канвы (см. III.34 и III.35).





Прежде чем подать узор на динамик, его приходится снова усилить, — это и есть третий этап усиления.

Все упомянутые этапы проходит сигнал и в вашем приемнике, стоящем у вас в комнате.

Но приемник — это лишь одна область великого «королевства кривых зеркал», он решает всего лишь одну из многих задач. Правда, именно радиовещательные передатчики и приемники дали развитию электроники первый толчок. Но в настоящее время радиовещание — это всего лишь ее узкая область в широчайшем поле самых различных дел. Среди них едва ли найдется хотя бы одно такое, где электроника обходилась бы без «кривого зеркала», то есть без нелинейных преобразований сигнала: модуляции, детектирования, преобразования частоты. С помощью модуляции можно записать на несущем сигнале не только музыку или человеческий голос, но и любую информацию, которую хотят передать. Это могут быть данные об интенсивности излучений, о давлении или температуре в контейнере космического корабля. Сообщение это передается уже не словами: специальные датчики превращают излучение, температуру, давление в соответствующий сигнал. Сигнал подается на модулятор, а в результате — знакомая нам картина с узором и канвой.

На несущем сигнале можно записать телеграфную азбуку или специальный условный код. В локационной станции модуляцией создают короткие импульсы, которые полетят «верхо́м на несущем сигнале» до цели (например, до самолета противника) и, возвратившись обратно, вовремя сообщат об опасности и о том, где находится враг. Так благодаря им-



пульсной модуляции удалось воплотить в локаторах те чудесные качества, которыми обладал сказочный Золотой петушок.

А передача изображения? О нем в свое время тоже складывали сказки. Вспомните многочисленные волшебные кольца, волшебные яблоки, блюдца с волшебной жидкостью и волшебные зеркала. Эти сказочные «приборы» позволяли видеть все, что происходит «за лесами, за долами, за широкими морями» и за «тридевять земель».

На деле все оказалось проще — зеркало не обязательно должно быть волшебным, им может служить экран электронной трубки. Но прежде чем попасть на экран телевизора, кадр с изображением далеких событий тоже должен быть записан на несущем сигнале с помощью электронных «кривых зеркал».

Вот какую огромную роль призван играть в электронике процесс модуляции — с его помощью удалось превратить в действительность очень многие сказки.

Те дела, которые были отданы раньше на откуп волшебникам, совершаются с помощью электроники и ее чудесных «кривых зеркал».

Ионосфера и бильярд

Слово, сказанное в Европе, можно услышать по радио в Австралии и в Америке. Зато матч, транслируемый по телевидению с московского стадиона, не увидишь на телеэкране, отъехав от Москвы километров на сто пятьдесят. В чем тут дело?

Телевидение помогло нам впервые увидеть поверхность Луны. А до нее, как известно, 384 тысячи километров!

Выходит, что с помощью телевидения легче заглядывать в космос, чем обеспечивать связь на Земле? Чем это объясняется?

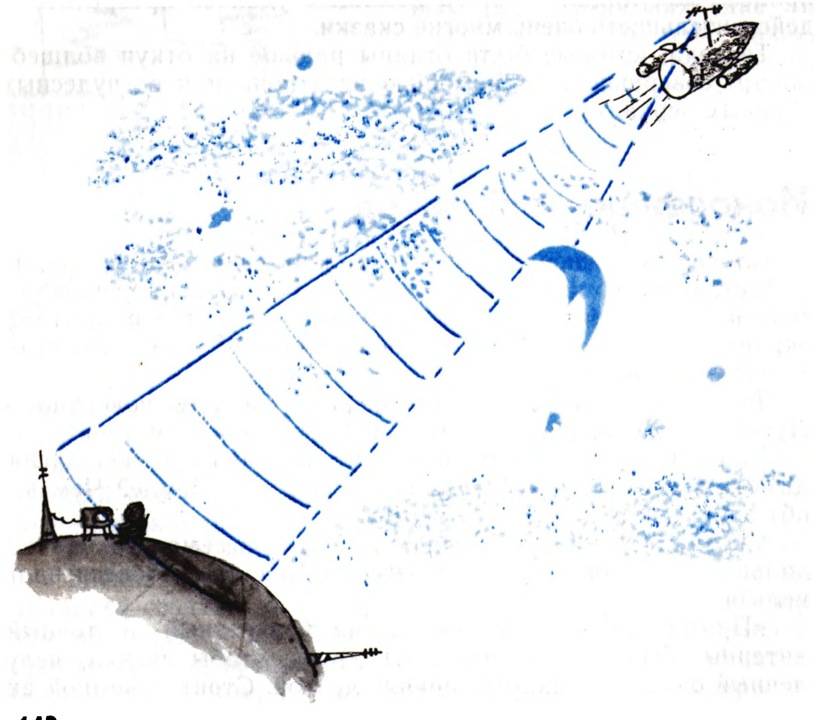
Специалист на этот вопрос ответит весьма лаконично: дальше пределов прямой видимости посылать телесигналы нельзя.

«Прямая видимость» — термин конкретный и точный: антенны должны «видеть» друг друга, чтобы сигнал, излученный одной из них, был принят другой. Стоит приемной ан-

тенне спрятаться за горизонтом, и сразу исчезнет связь. Линия горизонта является для телевидения своеобразной запретной чертой. А в космосе нет горизонта. Прямая видимость здесь беспредельна: смотри хоть на миллиард световых лет вперед! Сможешь ли ты что-нибудь там увидеть — это другой вопрос. Но дорога сигналу открыта, и, пока космический корабль не спрячется за какое-нибудь небесное тело, с ним можно поддерживать телевизионную связь. На Земле — дело другое: на Земле мешает Земля.

Однако покинем на время космос, спустимся с неба на Землю и зададим себе новый вопрос. А как же тогда путешествует слово, которое передается на другой континент? Почему в этом случае радиоволнам не мешает шарообразность Земли?

Лет сорок пять назад этот вопрос был для науки загадкой. На первых порах электроника обходилась длинными волнами (от 800 до 3000 метров), которые, обладая способностью огибать земную поверхность, обеспечивали довольно дальнюю связь. Но весь земной шар обогнуть эти волны не могут, и потому связь Австралии с Америкой или Европой на таких волнах обеспечить нельзя.



Известны были также короткие волны (от 10 до 100 метров). Поскольку они распространяются прямолинейно и огибать Землю не могут, считалось, что дальше видимого горизонта они не идут. Поэтому их отнесли к числу волн неудобных и не стали проектировать станций, работающих на коротких волнах. Диапазон этот отдан был на откуп радиолюбителям, которых уже в то время было хоть отбавляй.

И вдруг случилось событие, поставившее специалистов в тупик. Оказалось, что с помощью коротковолновых любительских станций можно поддерживать связь с любой точкой Земли! Маленькие передатчики, потреблявшие не больше энергии, чем двадцатисвечовая лампочка, посылали сигналы дальше, чем длинноволновая станция мощностью в несколько киловатт!

Мало этого. Те же самые передатчики невозможно было услышать, удалившись от них всего километров на двести. Получалось так, словно, проделав короткий путь, сигнал «умирал от усталости», а затем где-то за тридевять земель воскресал вновь.

Загадка казалась неразрешимой.

Лучше всех умел разгадывать такие загадки советский ученый Михаил Васильевич Шулейкин. Помните, как он разгадал секрет непрерывного излучения радиостанций, созданных немцами во время войны?

Михаил Васильевич дал точное объяснение странному поведению коротких радиоволн. Он подсчитал, что короткие волны, идущие близко к земной поверхности, в самом деле быстро теряют силу, потому что они гораздо сильнее, чем длинные, поглощаются поверхностью земной коры. Но даже в том случае, когда станция излучает коротковолновый сигнал с большим запасом энергии, ему все равно далеко по Земле не уйти. Огибать Землю короткие волны не могут. Значит, во всех случаях жизни линия горизонта будет для них запретной чертой.

Но природа предоставила им другую возможность для дальних странствий.

В верхних слоях земной атмосферы под воздействием радиации Солнца и града метеоритов образуется ионизированный слой. В этом слое нейтральные молекулы воздуха распадаются на ионы и электроны, и весь он представляет собой подвижное столпотворение обладающих зарядом частиц. Короткие волны (от 10 до 100 метров) отражаются от этого слоя, подобно тому как луч света отражается от поверхности зеркала или звук от преград. А еще можно сравнить этот

слой с бортом бильярда. Кстати, специалисты по связи и пользуются им так же, как бильярдисты бортом: если шар не идет прямо в лузу, можно играть от борта.

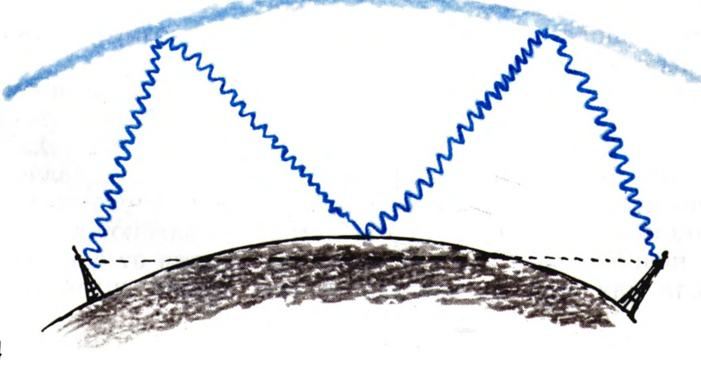
Таким же вот рикошетом попадают в ваши приемники волны далеких станций, излучающие коротковолновый сигнал. При этом он может испытать рикошет не единожды, потому что Земля тоже является своеобразным бильярдным бортом.

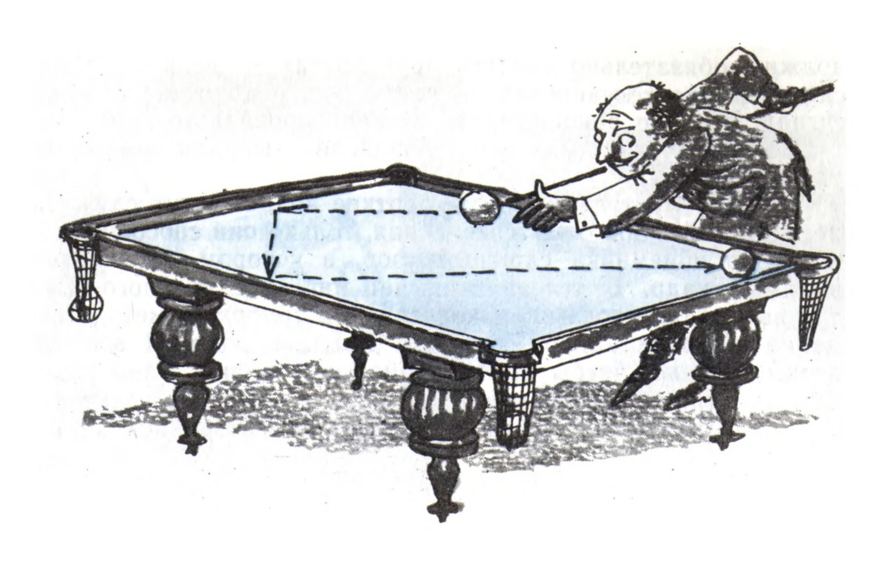
Однако в том случае, если приемник расположен от станции на расстоянии 200 километров, никакая волна к нему не придет. Волнам, шагающим по поверхности, преградит путь горизонт. А воспользоваться рикошетом нельзя, так как расстояние в пределах 200 километров для этого слишком мало. Известно, что угол падения равен углу отражения. Для того чтобы волна, отразившись, попала в приемник, удаленный на 200 километров, ее приходится направлять к ионосфере почти под прямым углом. Она круто врезается в ионизированный слой атмосферы и, пронзив его, уходит в далекий космос, навсегда простившись с Землей. Так возникает зона молчания, опоясывающая вокруг радиостанции определенный участок Земли.

Невдалеке от станции слышны волны, идущие прямо. На большом расстоянии — пологая траектория для волн, испытывающих рикошет. А в зону молчания, в те участки, которые не далеко и не близко от станции, не ведет ни один из путей.

Именно этим вот обстоятельством и было вызвано заблуждение относительно дальности связи на коротковолновом сигнале. Исчезновение сигнала в зоне молчания и появление его на расстояниях более дальних было не так-то легко объяснить.

Теперь изучено влияние ионосферы на волны любой длины. Волны от 100 до 1000 метров (так называемые средние

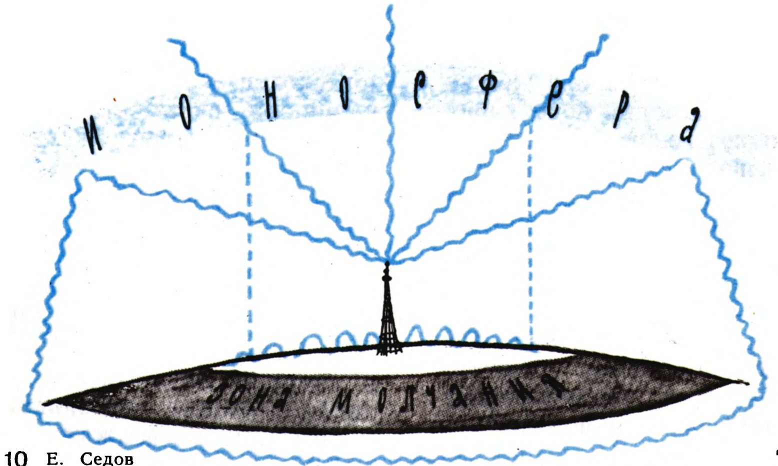




волны) хорошо отражаются ионосферой лишь ночью. Днем состав ионосферы меняется, и отраженной энергии становится недостаточно для надежной связи в этом диапазоне. Тот, кто любит ловить дальние станции, очевидно, заметил эту особенность средних волн.

Длинные волны (длиннее 1000 метров) не отражаются ионосферой ни ночью, ни днем.

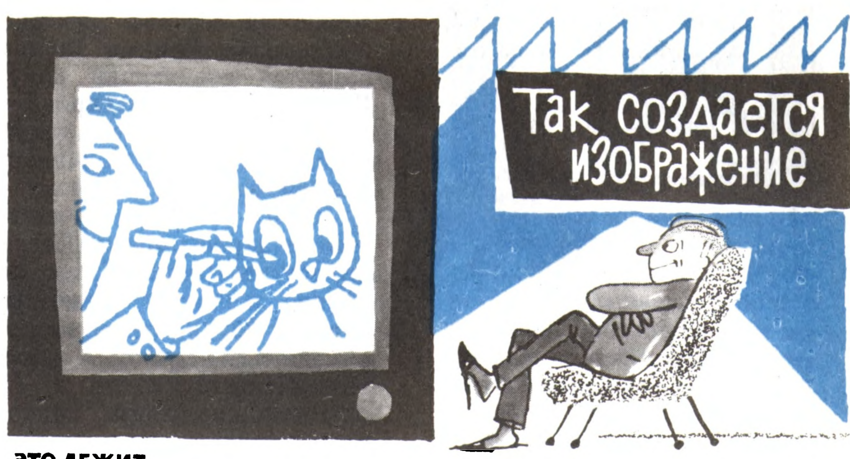
Что касается волн ультракоротких (10 метров и меньше), то ионосфера им кажется не более плотным барьером, чем воде решето. Вся их энергия просачивается сквозь этот слой, не отражаясь назад. Потому-то телевизионные антенны и



должны обязательно «видеть друг друга» — ведь несущим сигналом для телевидения является ультракоротковолновый сигнал, а он не рикошетирует от ионизированного слоя.

Но почему же создатели телевидения выбрали самые неудобные волны?

Потому что только ультракороткие волны могут служить несущим сигналом для телевидения, только они способны донести до приемника сложный узор, в котором содержится видимый кадр. В телевидении нет ничего случайного. Все тут выстрадано годами: и конструкция трубок, и метод создания видимых кадров, и длины несущих волн. И все это взаимосвязано: чтобы выбирать несущие волны, надо хорошо представлять себе, каким образом с помощью электронных приборов создается изображение в телевизионном кадре.

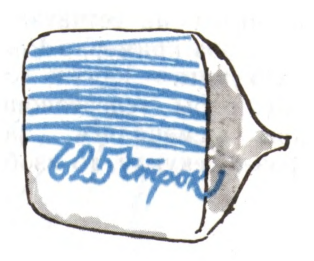


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

III.36

Внимательно всматриваясь в изображение на телевизионном экране, можно заметить, что оно состоит из большого количества горизонтальных линий — их называют строками. Каждый передаваемый кадр содержит ровно 625 строк.

Движение луча по строкам кадра очень похоже на движение глаза во время чтения книги: пробежав строку слева направо, луч очень быстро вернется в левую часть экрана, к началу следующей строки. За $^1/_{25}$ долю секунды луч успевает «прорисовать» на экране 625 строк, составляющих один кадр. Затем, тоже за $^1/_{25}$ долю секунды, «прорисовывается» следующий кадр. За секунду кадры сменяются ровно 25 раз.





III.37

Число строк в кадре и количество кадров в течение каждой секунды выбраны не случайно. Здесь учтены два свойства нашего зрения: инерционность и разрешающая способность.

Инерционностью называ-



ют способность сетчатки глаза сохранять определенное время очертания только что увиденного образа. Предмет наблюдения может исчезнуть из поля вашего зрения, но благодаря инерционности изображение его сохранится на сетчатке вашего глаза примерно $^{1}/_{15}$ долю секунды.

Если бы телевизионные кадры сменялись реже 15 раз в секунду, то изображение на сетчатке исчезло бы раньше, чем на экране появится следующий кадр. Глаз стал бы фиксировать смену кадров. При такой передаче у зрителя рябило бы в глазах.

Кроме того, надо учесть, что на экране почти всегда что-то движется. Если от кадра к кадру какой-то предмет будет заметно перемещаться, зритель заметит скачки.

Возможно, вам приходилось видеть, как смешно движутся люди в старых кинокартинах. Это объясняется тем, что число кадров в секунду в то время было слишком мало — 16 кадров в секунду. Чтобы избежать этого, в телевидении число кадров в секунду увеличили до 25.

III. 38

Расстояние между строками кадра выбиралось с таким расчетом, чтобы зритель, сидящий на расстоянии одного метра от экрана, не мог видеть отдельных строк. Он видит весь кадр под углом около 10 градусов, то есть 600 угловых минут. Разрешающая способность нашего глаза позволит увидеть две строчки раздельно, если угол превысит 1 минуту. Чтобы строки сливались в кадре, их должно быть не меньше чем

$$\frac{600'}{1'} = 600 \text{ строк.}$$

На самом деле их 625.

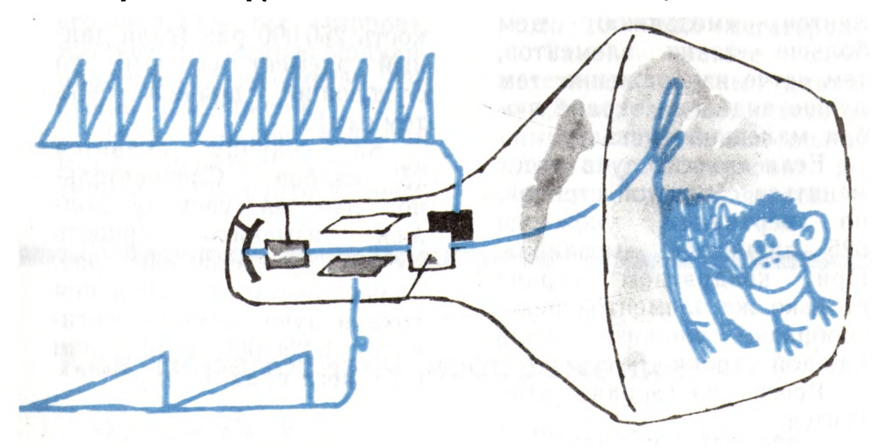


III.39

Как заставить луч бежать вдоль строки, мы уже знаем: нужно подать на горизонтально - отклоняющие пластины «пилу» *.

При получении изображения импульса луч все время повторяет пробег вдоль одной и той же черты в середине экрана. А в телевидении каждая новая строка должна проходить ниже, чем предыдущая. Для этого надо заставить луч, двигаясь слева направо, одновременно смещаться вниз. С этой целью на вторую пару пластин электронной трубки можно подать более медленную пилу. Пока один зуб медленной пилы смещает луч от верхней до нижней части экрана, быстрая пила создает целых 625 зубьев, заставляющих луч повторить путь слева направо 625 раз. В телевизорах с большой трубкой, например в «Рубине» и «Алмазе», скорость пробега луча по строкам достигает почти 30 000 километров в час. (Окружность земного шара имеет длину около 40 000 километров.)

В современных телевизионных приемниках луч управляется не пластинами, а магнитным полем катушек. В обмотки катушек подают пилообразный ток.



III.40

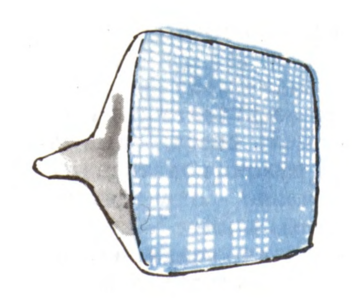
Если за время пробега луча по кадру его яркость останется неизменной, весь экран будет освещен равномерно, кадр будет «слепым».

Но обычно яркость луча непрерывно меняется. На экране чередуются свет-

---

* См. главу I, разделы «След невидимок» и «Почти по задачнику».

лые и темные пятна, которые, словно мозаика, образуют пейзаж, эпизод футбольного матча, лицо ведущего крупным планом — в общем все то, что попадает обычно на телеэкран.



III. 41

Если кадр состоит из крупных деталей, соседние строки освещены одинаково. При передаче же мелких деталей отличаться по яркости могут даже две соседних строки. И вдоль каждой строки может уложиться определенное число элементов «мозаики». Чем больше таких элементов, тем четче изображение, тем лучше видна на экране любая маленькая деталь.

Если яркость луча будет меняться с каждой строкой, по вертикали уложится 625 элементов «мозаики». При квадратном экране столько же элементов целесообразно уложить вдоль каждой строки.

Всего на экране уместится:

$$625 \cdot 625 = 390\,625.$$

Обычно ширина кадра составляет $^4/_3$ от его высоты. В таком кадре должно уместиться столько элементов:

$$625 \cdot {}^4/_3 \cdot 625 = 500\,000.$$

Предположим, что каждый из элементов изображения должен отличаться по яркости от соседних. Как часто должна при этих условиях изменяться яркость луча? Разобьем все элементы на пары (светлый и темный). Пробегая каждую пару, луч изменяет яркость. В течение кадра луч обежит 500 000 элементов, или 250 000 пар. При этом он должен изменить яркость 250 000 раз (если данный элемент светлый, то следующий должен быть темным).

За секунду сменится 25 кадров. Следовательно, луч за секунду должен изменить яркость $250\,000 \cdot 25 = 6\,250\,000$ раз. Значит, частота изменения тока в луче должна составить 6 250 000 герц, или 6,25 мегагерца.



III. 42



Конечно, не каждое изображение должно содержать в себе все 500 000 элементов «мозаики». Но в каждом кадре наряду с крупными есть и довольно мелкие детали: черты лица, отражающие мимику талантливого актера, штрихи, нанесенные рукою художника, буквы мелкого текста, маленькая хоккейная шайба и т. д. и т. п. Чтобы все эти детали были четко видны на экране вашего телевизора, надо рассчитывать, что частота изменения яркости в предельных случаях достигает 6,25 мегагерца. Луч изменяет яркость под воздействием тех «узоров», которые с помощью модуляции нанесли на сигнал, несущий изображение.

Зная, с какой частотой может меняться узор, нетрудно определить и несущую частоту. Поскольку несущий сигнал служит канвою, его частота должна превышать частоту узора приблизительно в десять раз. Только при этом условии все нюансы узора будут точка за точкой передаваться на гребнях несущей волны *. Значит, несущая частота телевизионных сигналов должна быть порядка $6{,}25 \cdot 10 = 62{,}5$ мегагерца.

Такой частоте соответствуют волны длиной в 4,8 метра. Это и есть те самые «неудобные» волны, для которых горизонт является запретной чертой.

Как переносится изображение

Узор, в котором содержится голос диктора или звук музыкального инструмента, создается с помощью микрофона. Микрофон превращает звуковые колебания воздуха в переменный, колеблющийся ток.

А как создается узор, содержащий изображение?

Здесь опять приходит на помощь электронная трубка, но принцип действия и конструкция этой трубки (ее называют

* См. главу III «Экспресс-невидимка».

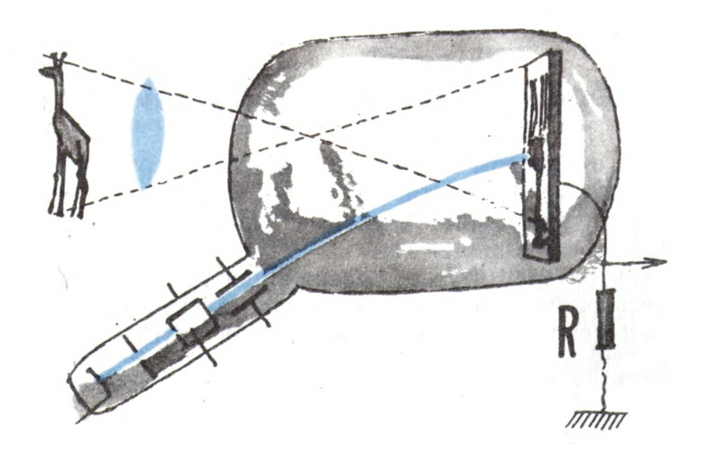
передающей трубкой или иконоскопом) существенно отличаются от тех трубок, о которых шла речь до сих пор.

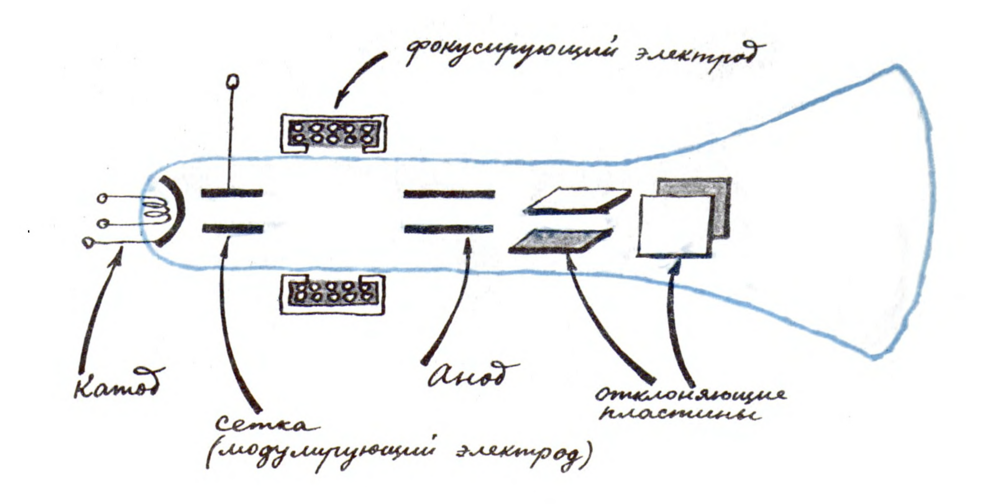
Слой, которым покрыт экран этой трубки, обладает особым свойством: электрическое сопротивление его будет тем меньше, чем сильнее он освещен. Передача осуществляется так.

На экран с помощью обычных оптических линз проектируется изображение, которое необходимо превратить сначала в колебание тока, а затем в электромагнитные волны, излучаемые в эфир. Сзади экрана, так же как в трубке обычного телевизора, разворачивая строчку за строчкой, скользит электронный луч. Поток электронов омывает внутреннюю поверхность экрана, словно струя брандспойта, скользящая по стеклу. Ручейки электронов бегут по проводящему слою и стекают на землю через сопротивление R. Чем больше освещена поверхность экрана, тем сильней ручеек, потому что сопротивление проводящего слоя уменьшается от световых лучей.

Когда луч, скользящий по строчкам, попадает в светлые части изображения, «ручеек», бегущий через сопротивление R, достигает значительной величины. Когда луч смещается в слабо освещенную область экрана, ток становится более слабым. Луч обегает строчку за строчкой, превращая изображение в непрерывно меняющийся во времени электрический ток. Так возникает узор. Если теперь этим током (точнее, тем напряжением, которое создает этот ток в сопротивлении R) промодулировать ультракороткие волны, узор, в котором содержится изображение, «сядет верхом» на несущий сигнал.

Судьба такого сигнала в телевизионном приемнике похожа на судьбу сигналов радиовещательных станций: он тоже





усиливается там по этапам, проходя сквозь систему «кривых зеркал». Сначала усиливают его на высоких частотах, затем на промежуточных, потом он подвергается детектированию, а на последнем этапе усиливается чистый узор.

А дальше? Поворот судьбы, возможно, покажется неожиданным. Достигнув финиша, сигнал должен снова осуществить модуляцию: на этот раз он модулирует луч. Для этого в дополнение к тем деталям, которые были рассмотрены нами на рисунке I.19, в телевизионную трубку вводится еще один модулирующий электрод. Его называют еще и сеткой, потому что, так же как сетка в триоде, сетка в телевизионной трубке влияет на поток электронов, образующих луч. На этот электрод и подается узор, содержащий изображение в кадре. С изменением напряжения на модулирующем электроде изменяется яркость луча.

Для того чтобы все элементы «мозаики» попали в нужные точки экрана, вместе с сигналом изображения на несущем сигнале записаны специальные импульсы. Эти импульсы служат командой для пробегов луча по экрану приемника.

В течение всей передачи лучи всех телевизоров одновременно с лучом передающей трубки берут старт и достигают финиша, 25 раз в секунду начиная и заканчивая кадр.

Миллионы лучей в любое мгновенье проходят по одному и тому же элементу «мозаики». 25 раз в секунду на миллионах экранов точка за точкой прорисовывается одинаковый кадр.

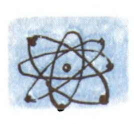


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

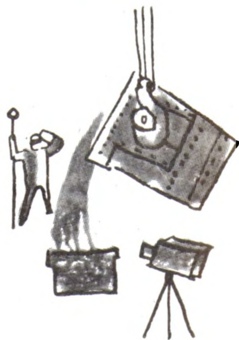
III. 43

В наш обиход прочно вошло телевидение. В различных отраслях науки и техники оно играет не менее важную роль. С помощью специального электронного глаза наблюдают, как раскаленный металл заполняет формы, как протекает радиоактивный процесс, опасный для жизни, показывают целой аудитории специалистов тонкую операцию, которую производит опытный и искусный хирург.

Компактная телекамера в геологическом буре позво-

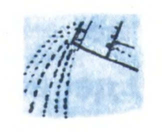
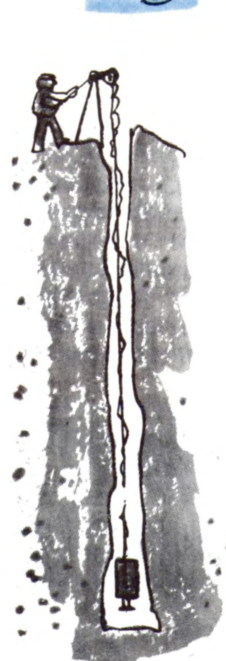




ляет исследовать слой за слоем породу на большой глубине. До внедрения телевидения для исследования каждого слоя приходилось извлекать на поверхность бур с пробами грунта.

С помощью телекамер нашли затонувшую подводную лодку «Эфрей» и обнаружили амфоры, в которых древние греки перевозили вино с острова Родос в Марсель.

Рыболовные суда преследуют рыбный косяк по указанию своего поводыря, которым обычно является самолет. Поставив на самолет телевизионную камеру, можно передать на борта судов изображения косяка.

Все помнят, как с помощью телевидения передавалось на Землю изображение поверхности нашей соседки по космосу — Луны.

Очевидно, и другие космические тела электронным



приборам суждено повидать раньше, чем нам.

С помощью телевидения осуществляются очень тонкие технологические процессы. Чтобы точно выдержать диаметр провода в несколько микрон, при изготовлении полупроводниковых триодов приходилось часами смотреть в микроскоп и измерять толщину провода. Теперь в объектив смотрит электронная трубка. Размер изображения сравнивается с эталонным сигналом. Если провод стал толще или тоньше хотя бы на десятые доли микрона, сразу возникнет разностный ток и автомат зафиксирует брак.

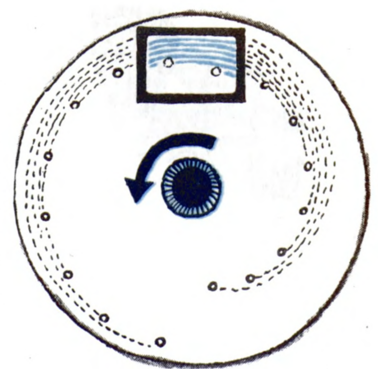
Обычные телекамеры, по существу, не являются «зрячими» — они лишь воспроизводят изображение, а видит его человек. Но в последние годы созданы и такие устройства, которые могут действительно видеть предметы, выделять их характерные признаки: отличать собаку от кошки и узнавать буквы алфавита независимо от почерка, шрифта или размеров букв.

Основой этих устройств (они называются перцептронами) является та же электронная трубка. Но чтобы прибор мог «узнавать» предметы, сигналы проходят сложную обработку с помощью вычислительных электронных устройств.

Где взять сто солнц?

Первый проект телевидения был предложен польским инженером Нипковым. Вместо экрана передающей трубки он использовал диск со множеством круглых отверстий. На диск проектировалось изображение. При вращении диска каждое из отверстий прочерчивало одну строку. А так как отверстия размещались по спирали, каждая следующая строка прочерчивалась ниже, чем предыдущая. Свет, проходя через отверстие, попадал на фотоэлемент.

Поскольку любое изображение состоит из темных и светлых пятен, яркость луча, а вместе с ней и ток фотоэлемента много раз изменяли свое значение, пока какое-нибудь из отверстий прочерчивало очередную строку. А все 30 отверстий (в диске Нипкова их было именно столько) раскладывали изображение на 30 строк, превращая его в непрерывно меняющийся во времени электрический ток. Этим пульсирующим током и модулировали несущий сигнал.



В приемнике этот ток заставлял «мигать» электролампу. Между лампой и экраном помещали второй диск Нипкова. Его отверстия прочерчивали на экране строки одновременно (синхронно) с диском на передающем конце. Такая идея передачи изображения довольно проста. Но какая вышла морока, когда попытались претворить это в жизнь!

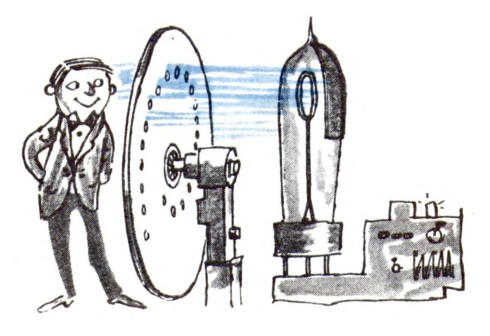
В 30-х годах в Москве на улице 25 Октября (в то время она называлась Никольской) работала экспериментальная студия телевидения. Она использовала диски Нипкова. О том, что из этого получилось, хорошо рассказывают журналы тех лет:

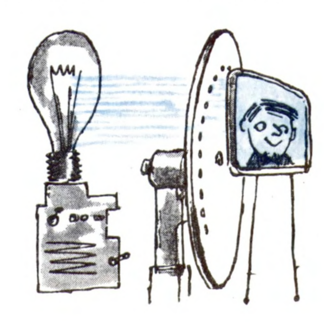
«Перед началом телевизионной передачи происходит немало комичных сцен. Исполнитель привык к обычному театральному гриму. Губы должны быть красными — это закон. Каково же бывает его удивление, когда гример накладывает на губы... темно-зеленую краску. Его, который переиграл сотни ролей, гримировался под Отелло, под негра и Квазимодо, никогда еще не раскрашивали в цвета экзотического какаду!»

«...Гимнаст выступал в черных трусах на темном фоне. На экране трусы исчезли. Тогда темный фон сменили на светлый. Получился еще более потрясающий эффект: трусы на экране были видны отчетливо, но... исчез сам гимнаст».

А в чем тут, собственно, дело? Почему с диском Нипкова нельзя получить таких же изображений, какие дает нам современный экран?

Плохо, что кадр содержит всего 30 строчек. Смотреть на него не очень приятно: вместо слитного изображения — решетка из редких строк. Но с этим можно было бы даже мириться, если бы... Если бы вслед за трусами не исчезал сам гимнаст. Почему же он исчезает? Хуже, лучше — но пред-







мет-то все-таки должен быть виден в кадре даже при очень малом количестве строк!

А раз предмет исчезает, значит фотоэлемент не почувствовал разницы между рассеянным светом от фона и тем светом, который отражает предмет. И это вполне естественно: через малюсенькое отверстие в диске проходила лишь ничтожная доля света, а остальные лучи отражались диском и пропадали зря. Из-за такой расточительности и возникали все беды: и зеленые губы актеров и исчезающие на экране трусы.

Подсчитали, что кадр, полученный с диском Нипкова, стал бы таким же четким, как кадр современного телевизора, если бы источник света давал освещенность в 100 раз более сильную, чем свет прямого солнечного луча!

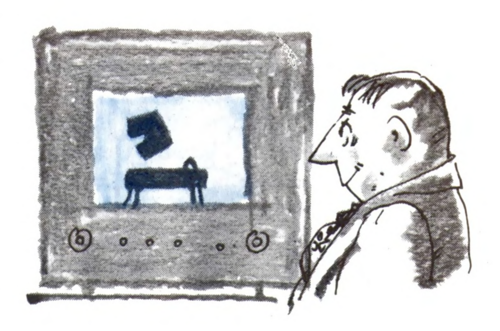
Но разве мыслимо создать на земле такие источники света, которые заменят 100 солнц!

А может быть, можно расходовать свет более экономно?

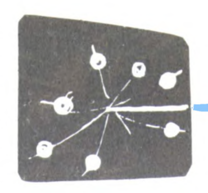
Инженер Зворыкин пошел именно этим путем. Еще







в 1907 году профессор Петербургского университета Борис Львович Розинг предложил использовать в телевизионном приемнике электронную трубку. Его ученик Зворыкин развил эту идею и разработал передающую трубку, способную «накапливать свет».



Как она это делает?

Оказывается, просто. Стоит сравнить метод Нипкова с тем методом, который мы рассмотрели раньше, и все встанет на свои места. Перед экраном трубки нет никаких узких отверстий — весь свет, отраженный предметом в направлении передающей трубки, падает на экран. В этом главное преимущество современной передающей трубки по сравнению с диском Нипкова. Благодаря этой разнице диск Нипкова стал атрибутом истории, а электронная трубка — неотъемлемой частью всех телевизионных систем.

Можно использовать разные методы накопления света.

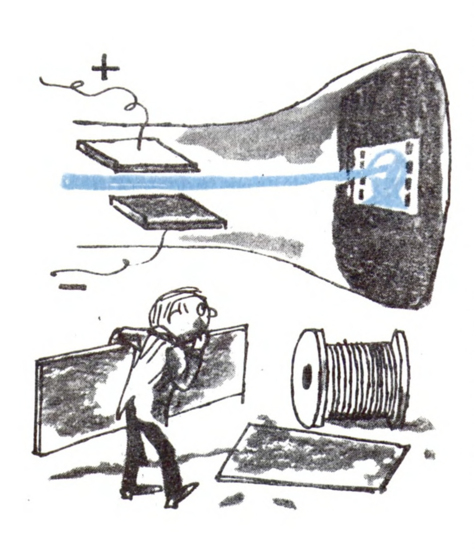
Рассмотренное в разделе «Как переносится изображение» изменение сопротивления под воздействием света называется «внутренним фотоэффектом». Очень часто экраны передающих трубок покрывают таким материалом, который дает внешний фотоэффект. Различия между тем и другим эффектом отражены в самих их названиях. При внешнем — электроны выскакивают из слоя, словно брызги с водной поверхности. Чем сильнее свет, тем больше брызг-электронов покидает светочувствительный слой. Когда электронный луч, пробегающий строчку за строчкой, попадает в определенную точку экрана передающей трубки, он отдаст ей часть своих электронов. Чем больше электронов выплеснулось под действием света из светочувствительного слоя, тем больше их будет отдано электронным лучом. Луч скользит по изображению, переходя от светлых участков к темным, и соответственно меняется ток луча.

Здесь опять накопление света. Свет на экран падает в течение всей передачи, а восстановление слоя происходит мгновенно: слой восстанавливается скользящим по строчкам электронным лучом.



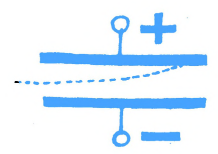
ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

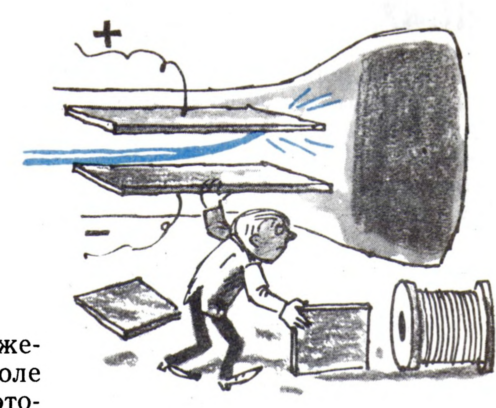
III.44



В первых трубках лучом управляли пластины. Но когда появились телевизионные трубки с большим экраном, пластины уже не могли справляться с этой задачей, так как они могли отклонять луч лишь на небольшой угол, а в этом случае развернуть кадр на весь экран, конечно, невозможно. В трубках с большими экранами на анод стараются подать высокое напряжение, в результате чего электроны достигают в них очень больших скоростей. Мимо пластин они пролетают мгновенно, и только очень сильное поле может заметно их отклонить.

III.45





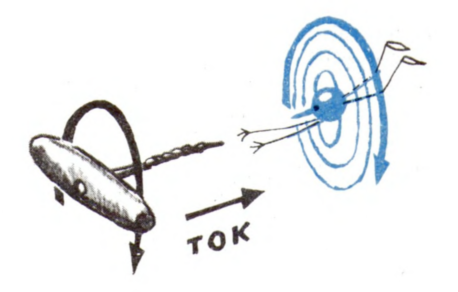
Чтобы выйти из положения, пытались усилить поле между пластинами. Для этого приходилось сдвигать пластины поближе друг к другу и увеличивать их площадь.

Результат получился парадоксальный: пластины смогли отклонить луч на нужный угол, но при этом луч стал упираться в одну из пластин.

Вот почему создателям телевизионных трубок пришлось вспомнить о том, что управлять электронами можно не только электрическими полями, возникающими между пластинами, но и магнитными.

III.46

На покоящийся заряд магнитное поле не действует. Но поскольку в электронном луче заряды находятся в непрерывном движении, вокруг них (так же, как и вокруг проводников с током) возникают своеобразные ореолы — поля магнитных сил.

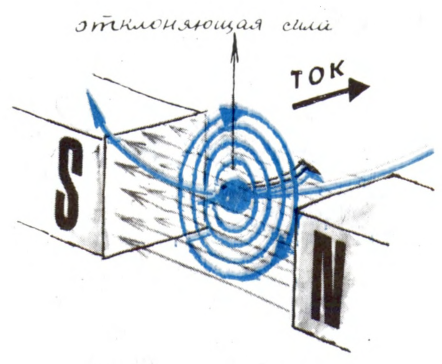


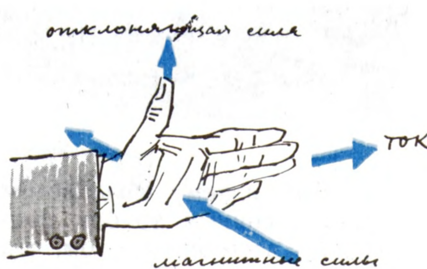
Направление сил совпадает с вращением головки буравчика, если сам буравчик движется в том направлении, куда течет ток*.

* Здесь опять-таки речь идет о техническом направлении тока (см. II.14).

III.47

Совпадение направления сил магнитных полей приводит к отталкиванию. Притяжение возникает в том случае, если силы действуют встречно *.

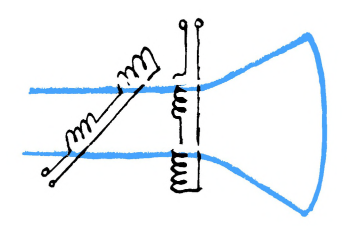




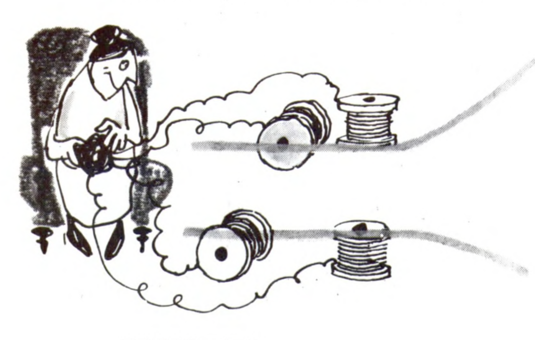

ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ

Над электроном магнитные силы направлены встречно, а под электроном их направление совпадает. При таком взаимодействии заряд будет смещаться вверх. Движение заряда в магнитном поле подчиняется правилу левой руки.

III.48



Для создания полей, отклоняющих луч, вместо постоянных магнитов в телевизионных трубках обычно используются катушки. Пара катушек, установленных вертикально около горловины трубки, смещает луч в горизонтальной плоскости. Другая пара, расположенная горизонтально, смещает луч вверх и вниз.



При изменении направления тока в обмотках магнитные полюса поменяются местами, и если до этого

* См. главу II «Куда повернется стрелка?».

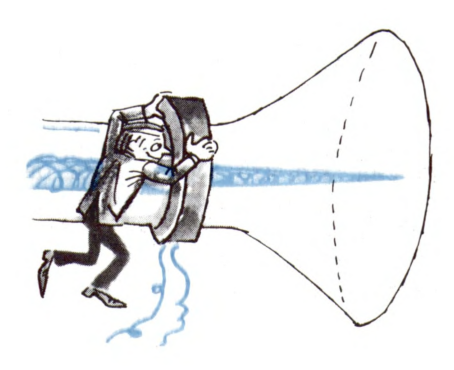
луч двигался вверх, то теперь он будет смещаться вниз, подчиняясь тому же правилу левой руки (см. III.47).

Питая катушки *пилообразным* током (быстрая пила на вертикальных катушках и медленная — на горизонтальных), можно *заставить луч* разворачивать кадр (см. III.39).

III.49

Разместить внутри трубки управляющие пластины, не нарушив при этом вакуума, удается с большим трудом. Процесс производства таких трубок чрезвычайно сложен. Значительно проще изготовляется трубка с магнитной системой — катушки не надо втискивать внутрь.





III.50

Катушка, насаженная на горловину, создает магнитное поле, направленное вдоль оси трубки. Такая катушка выполняет роль линзы: она направляет все электроны в одну точку экрана, то есть *фокусирует луч*.

Фигуры высшего пилотажа

Не трудно себе представить, насколько важной для телевидения является проблема фокусировки луча. Каждый из электронов, образующих луч, стремится непременно оттолкнуть от себя своих собратьев, летящих параллельным с ним курсом и имеющих одноименный заряд. Это стремление в свое время доставило создателям телевидения немало хлопот.

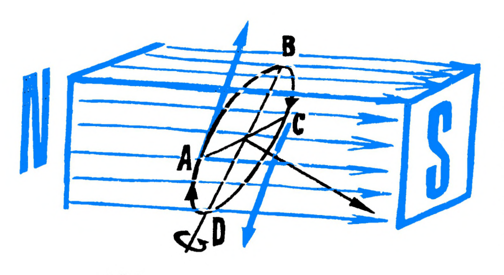
Вы помните, как боролись с этим явлением физики, применявшие первые электронные трубки? Они ставили на пути электронов цилиндрик и подавали на него отрицательный потенциал. Электроны отталкивались от стенок и собирались у оси, образуя тонкий пучок (см. I. 19). Но стоило им вылететь из цилиндра, и они вновь разбегались в стороны. Чем ближе к экрану, тем дальше они отталкивают друг друга, тем шире становится луч. Пытаться таким «лохматым» лучом нарисовать четкое изображение в кадре совершенно бессмысленно — это все равно, что пробовать нарисовать малярной кистью четкий портрет.

Значит, необходимо создать такую систему, которая была бы подобна обычной оптической линзе и фокусировала луч таким образом, чтобы фокус попал как раз на экран.

Эту задачу решают магнитные линзы. Когда по обмоткам катушки, посаженной на горловину трубки, течет ток, то он создает магнитное поле, силы которого направлены вдоль оси трубки.

Электрон, летящий вдоль силовых линий магнитного поля, игнорирует поле, потому что силы его ореола перпендикулярны направлению магнитных сил. Но что будет, если он вздумает отклониться от курса и устремится, например, вниз?

В точках *В* и *Д* силы останутся взаимно перпендикулярными, а в точках *А* и *С* перпендикулярность нарушится. Силовые линии ореола разложатся по двум направлениям и будут действовать не только перпендикулярно, но и вдоль силовых линий магнита. Электрон теперь игнорировать поле не может: продольные силы его ореола (F_A и F_C) будут взаимодействовать с силами внешнего поля. В точке *А* возникнет отталкивающая сила,

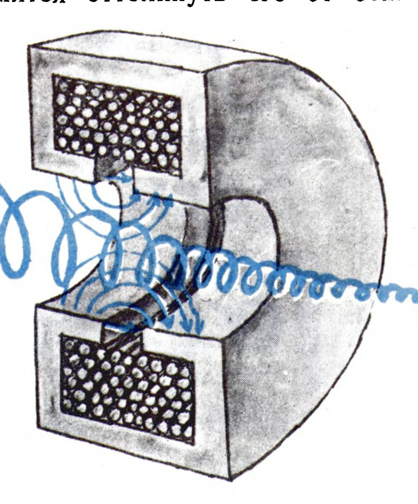


в точке *С* — притяжение. Ореол повернется налево (по ходу движения электрона), электрон изменит свой курс. Но как только он повернется налево, так в точках *В* и *Д* ореола тоже возникнет взаимодействие.

Повторите все рассуждения, и вы убедитесь, что силы, которые здесь возникают, повернут электрон снизу вверх. А раз он движется одновременно и снизу вверх и справа налево, то что представляет собой его траектория, догадаться нетрудно — круг.

Итак, отклонившись от курса, электрон попадает под двойное влияние. Анод электронной трубки по-прежнему тянет его к экрану, а поле магнитной линзы заставляет описывать круг. Что ему остается делать? Лететь к экрану, но уже не прямым курсом, а виражами, совершая виток за витком. Электрон «входит в штопор», словно маневренный самолет. Маршрут здесь рассчитан точно: магнитные силы с каждым витком закручивают электрон все сильнее, сами витки становятся меньше, и, когда электрон достигнет экрана, он окажется как раз у оси.

До чего же тернист путь электрона! Ни малейшей свободы движения. Со всех сторон он подвержен действию сил. Анод заставляет его лететь прямо к экрану. Летящие рядом многочисленные коллеги стремятся оттолкнуть его от оси. Но стоит ему лишь чуть-чуть отклониться от курса, как он попадает под воздействие магнитного поля.



И опять ни малейшей самостоятельности, хочешь не хочешь, придется «входить в штопор», совершать виток за витком.

И точно такие же перипетии переживает каждый из электронов, и все они, гонимые полем, попадают в одну и ту же точку экрана, образуя маленькое светящееся пятно.



ЭТО ЛЕЖИТ
В ОСНОВЕ

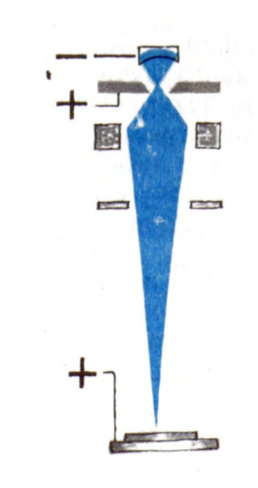
III. 51

Сфокусированный электронный луч нужен не только для телевидения. Он оказался прекрасным режущим инструментом при обработке металлов.

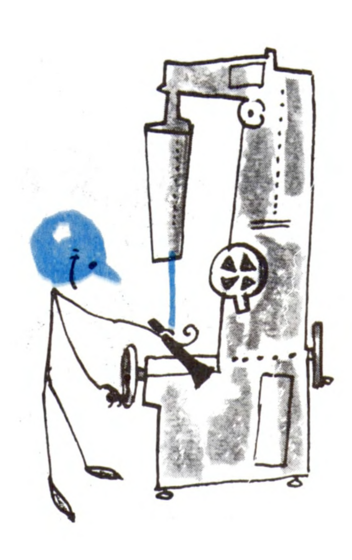
В последние годы электрон осваивает все больше и больше смежных профессий. Надо заметить, что специальностями токаря, фрезеровщика, сварщика и плавильщика электрон овладел за очень короткий срок.



III. 52



Внутри вакуумной камеры располагаются знакомая нам электронная пушка и обрабатываемый металл. Чтобы луч мог его резать, электронов в нем должно быть больше, чем в электронной трубке, примерно в 100 раз. Кроме того, он должен быть достаточно острым, для чего магнитной фокусировкой уменьшают его диаметр до нескольких микрон. В этом малом диаметре сосредоточена такая энергия, что в пересчете на площадь в один квадратный сантиметр она эквивалентна проектной энергии турбин Красноярской ГЭС! Не удивительно, что в точке соприкосновения луча с металлом возникает солнечная температура — градусов около 6000. Таким лучом резать любые металлы, даже самые тугоплавкие, не труднее, чем масло ножом. При неподвижном луче в металле просверливается (прожигается) отверстие, а если смещать луч с помощью поля, он с успехом заменит фрезу.

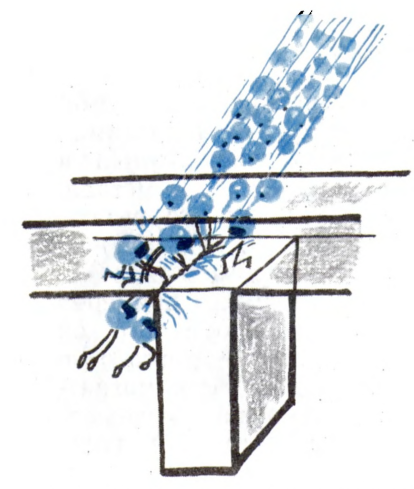


III. 53

Подобным же образом производится сварка металлов. Мощность луча при сварке исчисляют уже десятками киловатт. Достигнув металла, электроны в нем резко тормозятся, и вся их кинетическая энергия превращается в тепло. При этом луч создает на глубине 0,001—0,1 миллиметра энергию в сотни раз

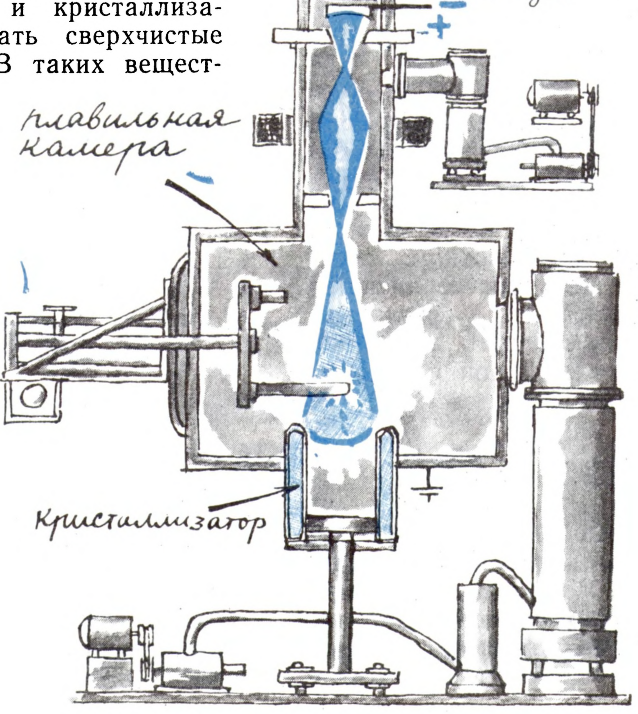
большую, чем любой источник тепла. Применение электронного луча преобразует всю технологию сварки — например, можно вести сварку в несколько ярусов или прямо сквозь лист металла производить Т-образные швы.

Управляя лучом, можно вести фигурную сварку с такой точностью, какой никогда не достиг бы сварщик, держащий в руках сварочный инструмент.



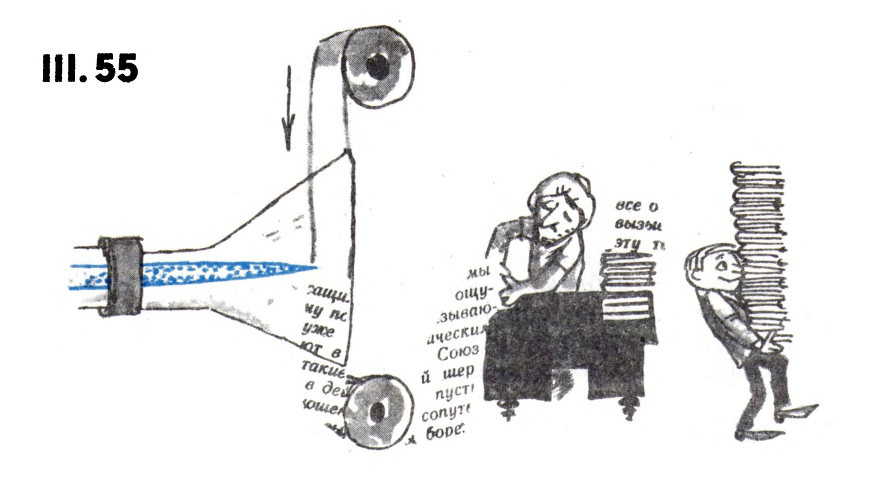
III. 54

Новые возможности открыла электронная плавка. Она позволила путем расплавления и кристаллизации получать сверхчистые вещества. В таких веществах нуждается ракетная и атомная техника, да и сама электроника не могла бы без них обойтись. Известно,



что полупроводниковой технике нужен германий, содержащий не более десятимиллионной доли грамма примесей на один килограмм (всего стомиллионную долю процента!). Этого можно достичь с помощью тех же электронных лучей. Надо лишь довести мощность луча до полутора тысяч киловатт. Металл, который подлежит расплавлению, помещают на место анода. Расплавляясь, он стекает в кристаллизатор, а примеси испаряются и оседают на стенках камеры.

Процесс этот повторяют неоднократно, до тех пор, пока металл не достигнет требуемой чистоты.



III.55

А вот электронный луч совсем в ином применении — в новом методе печатанья книг. Установка похожа на телевизор, но вместо экрана — бумажная лента, на которой луч прочерчивает строку за строкой. Луч модулирован изображением печатного текста. От него на бумаге остается заряд. Распыленная типографская краска и наэлектризованная бумага встречаются внутри камеры, бумага притягивает частички краски, и текст проявляется, как на фотопластинке. Такое устройство позволяет создать 25 оттисков за секунду *, или 1500 печатных страниц в минуту, в то время как на обычном ротаторе в течение каждой минуты получают всего лишь 30 страниц.

---

* Та же скорость, что в телевидении: 25 кадров в секунду.

Частица или волна?

«Электрон так же неисчерпаем, как атом», — сказал Владимир Ильич Ленин в самом начале нашего века. И все дальнейшее развитие физики подтвердило мудрость ленинских слов.

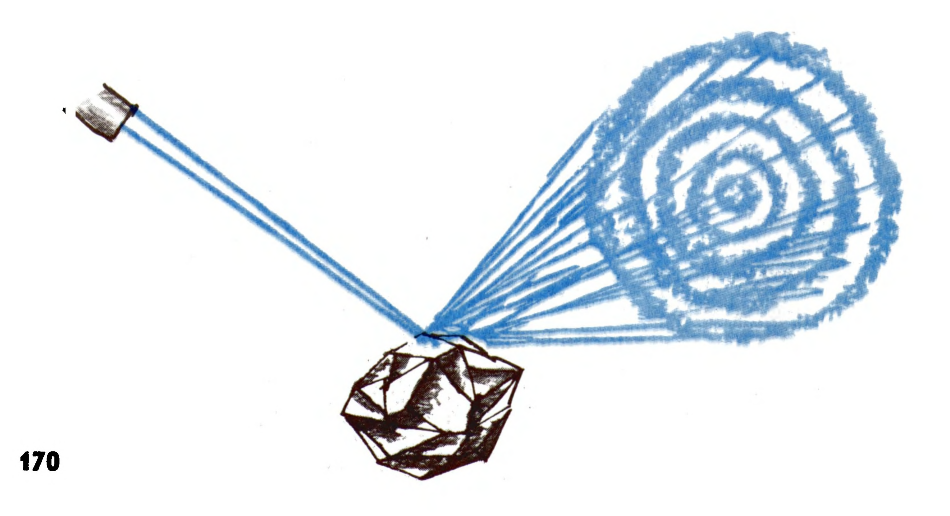
Открытие электрона было лишь первым — шапочным — знакомством с этой частицей. Проникнуть внутрь электрона, узнать, как он устроен, — вот очередная задача, которую еще предстоит решить.

Пока мы знаем лишь те черты его поведения, которые можно заметить, наблюдая за ним со стороны. И тут еще далеко не все ясно.

В большинстве известных явлений электрон ведет себя как заряженная частица. Но физики знают и такие случаи, когда он ведет себя подобно волне.

Если световые лучи, отражаясь от кристалла, падают на экран, то на нем можно видеть картину интерференции волн. Объясняется это просто: волны, отраженные отдельными кристалликами, складываются друг с другом. Там, где гребень сложится с гребнем, волны усилятся; там, где встретятся гребень и впадина, возникнет темная полоса. Ввиду того что кристалл обладает упорядоченной структурой, на экране появляется четкое чередование темных и светлых полос.

Так обстоит дело с волнами. Но почему такие же полосы образуются от отраженных кристаллом электронных лучей? Значит, и электронный луч имеет гребни и впадины,



значит, и он состоит из волн? Так что же тогда представляют собой электроны — частицы или волны?

В 1924 году ответ на этот вопрос дал все тот же физик Луи де Бройль. Ответ был неожиданным: электрон одновременно является *и частицей и волной.* Де Бройль предложил знаменитую формулу, по которой легко подсчитать длину волны электрона, подставив в нее значение массы электрона и скорости, с которой он движется.

Электрон со «свободной волей»

Подобная двойственность физикам стала уже привычной. Ведь и свет, представляющий собой электромагнитные волны, состоит из фотонов, то есть из материальных частиц. Это свойство, очевидно, присуще различным видам материи. Ядерные поля состоят из мезонов. Подозревают, что и всемирное тяготение обладает такой же двоякой сущностью: с одной стороны — поля гравитации, с другой — непознанная частица, так называемый гравитон.

Но нельзя ко всему подходить с одинаковой меркой.

Несмотря на сходство их уравнений, волна электрона не тождественна электромагнитной волне. Волна электрона — это волна вероятности — не физическая, а математическая волна.

Темные полосы на экране соответствуют впадинам вероятностных волн. Вероятность того, что электрон попадет в эту область, очень мала. Гребень волны соответствует самой большой вероятности — большинство электронов попадает в те точки экрана, где находятся гребни вероятностных волн. Как будто логично. И в то же время...

Почему одни электроны попадают в точку с большой вероятностью, а другие — туда, где вероятность мала? Ведь они находятся в равных условиях! Почему же в таком случае они различно себя ведут?

Некоторые из физиков объясняют это явление приблизительно так: электрон сам себе выбирает путь. Электрон, по их мнению, обладает «свободой воли» — дескать, куда хочу, туда и лечу.

К подобным взглядам следует относиться критически. Различие в поведении электронов есть проявление статистических закономерностей, которым подчинено движение огромной массы этих частиц.

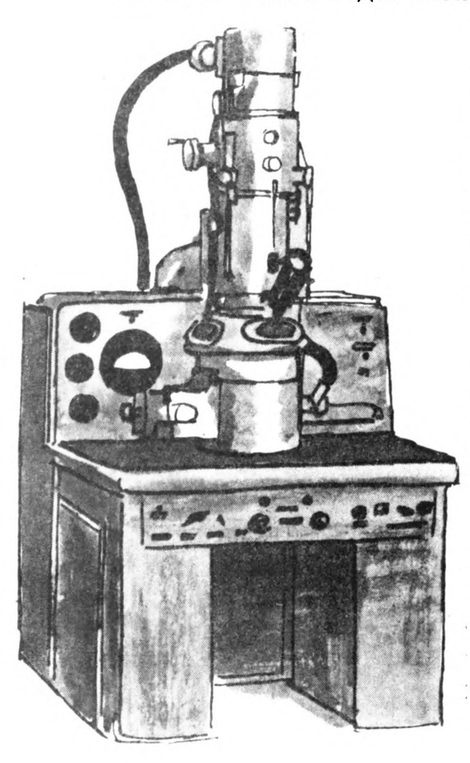
Есть законы природы, которые человек познает и использует. Зачем говорить о свободе воли электрона? Ведь вся история электроники убеждает нас в том, что электрон подчиняется законам природы; используя эти законы, можно заставить его подчиняться воле людей.

Как увидеть молекулу?

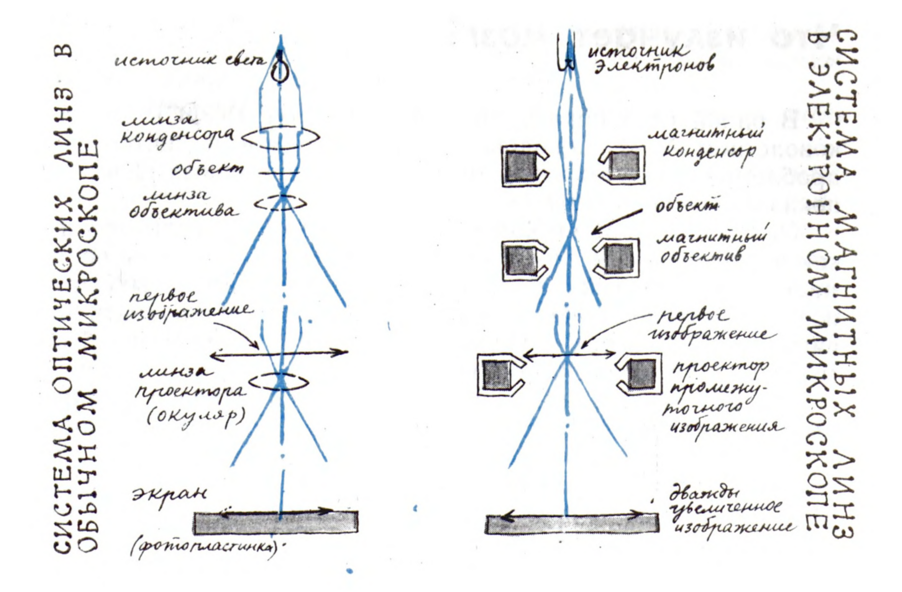
Раз существуют в природе электронные волны, значит можно пользу извлечь и из них. По сравнению с волнами света у них есть одно преимущество: они намного короче световых волн.

Не случалось ли вам наблюдать, как обегает морская волна прибрежные скалы? Скалу небольших размеров она попросту не замечает: бежит себе дальше, не оставляя следа. У большой скалы совсем иная картина: волна, отброшенная препятствием, бежит навстречу волне, набегающей следом, у подножия возникает след от взаимодействия бегущих и отраженных волн.

Световая волна ведет себя так же. Она не отражается от предметов, размеры которых меньше ее длины. Нельзя различить двух объектов, если расстояние между ними меньше длины световой волны. Этим и объясняется ограничение возможностей оптических микроскопов: ведь сквозь систему увеличительных линз микроскопа идет световая волна.



Самый малый предмет, который здесь можно увидеть, соизмерим с длиной световых волн. Эта длина составляет десятитысячные доли миллиметра, а точнее — от 0,4 микрона (фиолетовый цвет) до 0,7 микрона (красный цвет). Чтобы изображение стало видимым, надо, чтобы размеры его превышали десятые доли микрона. Только тогда его можно



увеличить до ощутимых размеров, скажем, до нескольких миллиметров, то есть в несколько тысяч раз.

И это все, что может дать оптический микроскоп.

Иное дело — микроскоп электронный. Здесь действуют электронные волны, которые могут быть короче волн света еще в 100 000 раз. Стоит лишь придать электронам определенную скорость, и они, подчиняясь формуле, выведенной де Бройлем, породят волны нужной длины. Правда, платить за это приходится немалую цену: чтобы придать электронам необходимую скорость, приходится подавать на анод напряжение, измеряемое сотнями тысяч вольт!

Оптические линзы обычного микроскопа с успехом заменяются знакомыми нам магнитными линзами.

Электронные волны могут заметить объект в 100 000 раз меньший, чем замечает световая волна. Но увидеть такие предметы микроскоп все же не позволяет, потому что магнитные линзы фокусируют луч хуже оптических. Увеличение электронного микроскопа больше, чем микроскопа оптического, всего лишь в 100 раз.

«Всего лишь...» Но и это не мало. Во всяком случае, только благодаря электронике люди смогли увидеть молекулу, наблюдать размножение вирусов и изучать структуру белков. А эти знания позволили биологии — науке о жизни — сделать еще один большой шаг вперед.

Что излучает мозг?

В одной из лабораторий Академии наук РСФСР под руководством А. Н. Соколова занимаются новой интересной проблемой: записью и расшифровкой неизреченных слов. Что показали эксперименты?

Оказывается, за несколько десятых долей секунды до того, как мы произносим слово, на речедвигательные органы поступает от мозга сигнал. Если к языку или к губам испытуемого подключить специальные электроды, можно улавливать эти сигналы даже в тех случаях, когда слово произнесено было мысленно, но не высказано вслух.

Значит, чтение мыслей? Отчасти да. Правда, запись этих сигналов, так называемых биопотенциалов, не так-то просто расшифровать. Но кое-чего уже удалось добиться: научились читать отдельные неизреченные звуки, установили, что биопотенциалы непосредственно связаны с процессом мышления: чем труднее вопрос, заданный испытуемому, тем выше измеренный потенциал.

Конечно, без электроники не удалось бы сделать и шагу. Чтобы биопотенциалы записать, надо усилить чрезвычайно слабый сигнал. Расшифровку таких сигналов осуществляют на электронной вычислительной машине (ЭВМ).

А нельзя ли улавливать те же сигналы там, где они возникают? Ведь они посылаются мозгом, а электроника позволяет записывать биотоки, рожденные мозгом, в виде энцефалограмм. Для этого к разным участкам головы подключаются электроды, которые заполняются специальной токопроводящей пастой, улучшающей контакт. Ток от каждого электрода поступает в свой усилитель, а с выхода усилителя сигнал подается на электромеханическое пишущее устройство или на специальный экран. На экране или на ленте самописца можно видеть сложные и многообразные кривые, соответствующие разным участкам коры головного мозга — от 30 разных точек 30 разных кривых.

Но если учесть, что каждая точка содержит в себе миллионы клеток, по которым циркулирует множество разных импульсов, можно представить себе, как не просто расшифровать подобный сигнал. Точно так же, подключившись к общему телефонному кабелю, передающему из конца в конец города тысячи разговоров, вы не услышите ни одного членораздельного слова среди тысячи одновременно сказанных слов.

Не удивительно, что к настоящему времени смогли понять

лишь самые общие вещи: какие частоты содержит сигнал, посылаемый мозгом, как отличить по энцефалограмме режим бодрствования от режима глубокого сна.

А что касается расшифровки слов или мыслей, то до этого пока далеко.

Может быть, есть другие пути решения этой проблемы? Ведь подмечено же, что иногда наблюдается передача мысленной информации прямо из мозга в мозг. И едва ли в век электроники кто-нибудь станет всерьез приписывать эти явления сверхъестественным силам: если с помощью модуляции можно на несущем сигнале передать телевизионные кадры, то почему нельзя подобным же образом передать зрительный образ, возникающий в чьем-то мозгу? Но если возможна телепатия, то почему нельзя построить такой приемник, который смог бы воспринимать излучения мозга не хуже, чем телепат?

Быть может, такой приемник действительно можно построить? Но для этого надо прежде всего познать природу несущих сигналов, на которых при телепатии путешествует мысль. А природа у них совершенно особая. Например, установлено, что связь с помощью телепатии возможна при любых расстояниях (разумеется, в масштабах земного шара), причем для нее не существует преград. Между индуктором (то есть тем, кто передает мысленную информацию) и перципиентом (тем, кто воспринимает) пытались ставить разные экраны, непроницаемые преграды для электрических и магнитных полей. На телепатию они не влияли. И это сбивает ученых с толку: ведь подобными свойствами не обладают электромагнитные волны всех исследованных частот. Значит, мысленная информация излучается мозгом на какой-то иной несущей волне. Но на какой? Это пока еще никому не известно. Можно лишь строить гипотезы, а затем, по мере возможности, их проверять. Вот, скажем, есть в природе одна частица, обладающая столь же чудесными свойствами. Речь идет о нейтрино. Нейтрино движется со скоростью света и обладает нулевой массой покоя. В этом отношении нейтрино весьма сходно с фотоном. Но есть у нейтрино и свои особые свойства. В частности, для этой частицы не существует преград. Нейтрино очень слабо взаимодействует с другими частицами, и потому для него прозрачны любые преграды, в том числе и вся масса земного шара и даже плита чугуна толщиной в миллиард расстояний от нас до Солнца!

Может быть, носителем мысленной информации как раз и является нейтрино? Но можно ли передавать изображения «верхо́м на частицах»? Можно. Ведь радиоволны тоже в ко-

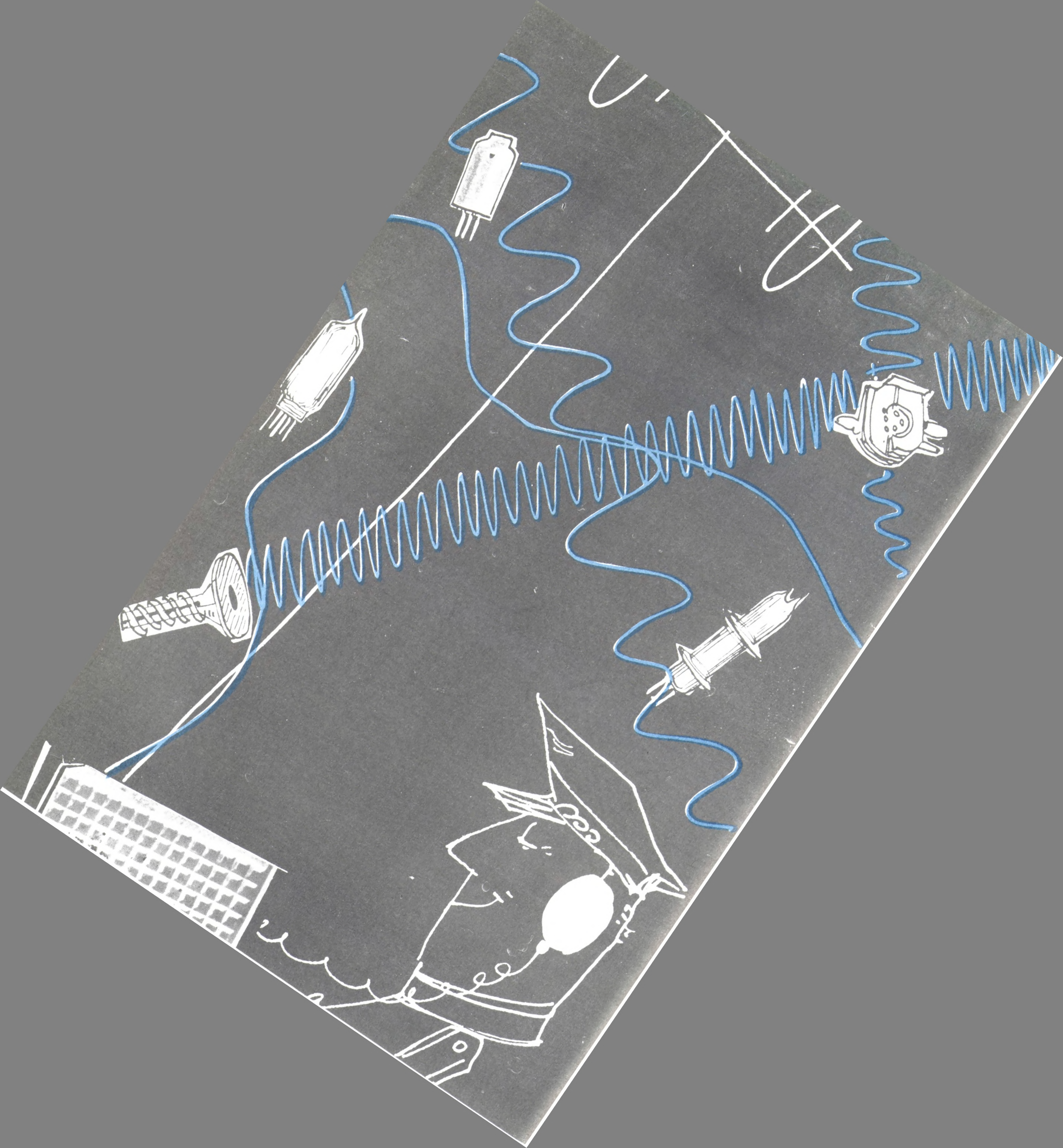
нечном счете состоят из частиц. Эйнштейн доказал, что такая волна состоит из фотонов. Так почему же не предположить, что частицы, похожие на фотоны, образуют нейтринные волны? Таких волн, правда, не наблюдали. Ну и что же из этого? Ведь радиоволны тоже смогли уловить значительно позже, чем их открыл Максвелл. А сколько времени занимались радиоволнами, не подозревая, что они состоят из частиц!

Может быть, с нейтринными волнами получится наоборот? Пока открыта частица нейтрино, а потом, может быть, обнаружат поле нейтринных волн?

ГЛАВА IV

вверх по шкале частот

О том, как из года
в год человечество
осваивало все более
и более
короткие волны
и что пришлось
пережить электронике
при освоении
сверхвысоких частот.



ВОЛНЫ ВСЯКИЕ НУЖНЫ

IV.1

Современная техника для разных целей использует волны различной длины. Эти волны дает ей электроника. Создано множество электронных приборов для получения волн длиной от нескольких километров до миллионных долей микрона.

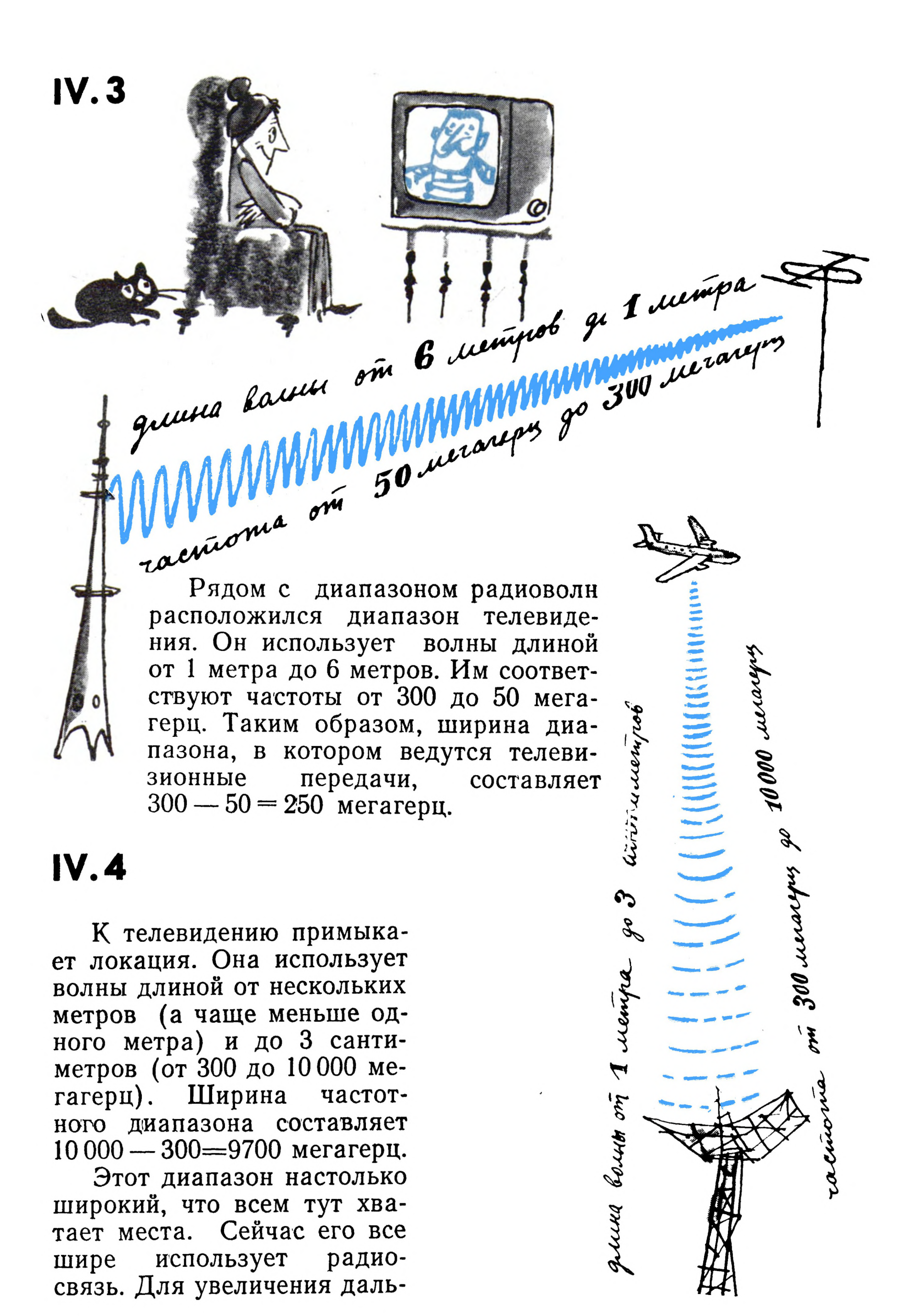
IV.2

Диапазон волн от 2 километров до 10 метров используется радиосвязью.

По формуле, приведенной на рисунке III.15, легко подсчитать, что волне в 2 километра соответствует частота 0,15 мегагерца (или 150 килогерц), а волне 10 метров — частота 30 мегагерц.



IV.3



Рядом с диапазоном радиоволн расположился диапазон телевидения. Он использует волны длиной от 1 метра до 6 метров. Им соответствуют частоты от 300 до 50 мегагерц. Таким образом, ширина диапазона, в котором ведутся телевизионные передачи, составляет 300 — 50 = 250 мегагерц.

IV.4

К телевидению примыкает локация. Она использует волны длиной от нескольких метров (а чаще меньше одного метра) и до 3 сантиметров (от 300 до 10 000 мегагерц). Ширина частотного диапазона составляет 10 000 — 300=9700 мегагерц.

Этот диапазон настолько широкий, что всем тут хватает места. Сейчас его все шире использует радиосвязь. Для увеличения даль-

ности связи применяют ретрансляторы, установленные, например, на искусственных спутниках.

Сантиметровые волны получают с помощью специальных приборов, например, таких, как магнетрон, клистрон или лампа с бегущей волной.

IV.5

В последние годы многочисленная семья электронных приборов пополнилась новыми членами — приборами для генерации миллиметровых и еще более коротких (субмиллиметровых) волн.

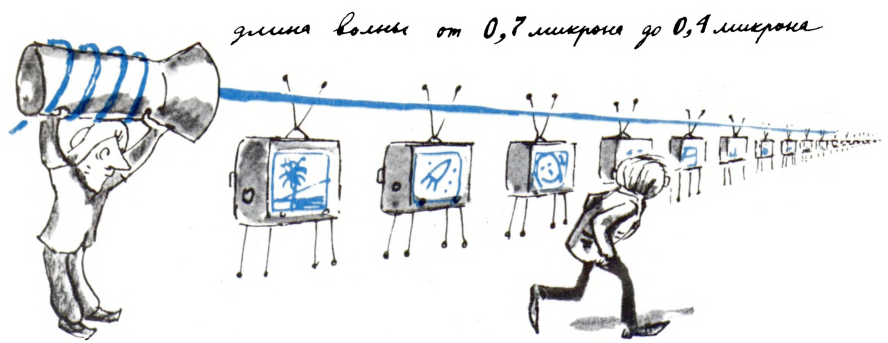
Созданы убитроны, ротатроны, ладдертроны, изитроны, ребатроны и т. д. и т. п. Все это экспериментальные устройства, и неизвестно пока, какому из них суждено завоевать в будущем такую же популярность, какой пользуются в настоящее время их старшие братья — магнетрон и клистрон.



IV.6

Диапазон частот, пригодных для связи и для локации, необычайно расширился с появлением квантовых генераторов — лазеров.

Лазеры расширили диапазон вплоть до волн с длиной в 0,4 микрона, то есть



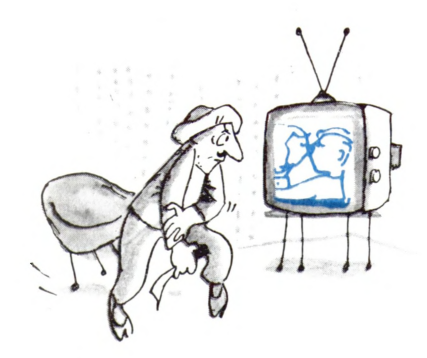
до частот 0,75 миллиарда мегагерц.

Диапазон этот совпадает с диапазоном видимых лучей света (0,4—0,7 микрона, то есть 0,75—0,4 миллиарда мегагерц). Он шире, чем полоса частот, содержащихся в телевизионном кадре, в 30 миллионов раз. Это значит, что, используя излучения лазеров в качестве несущих сигналов, можно передавать одновременно 30 миллионов телевизионных программ.

IV.7

длина волны от 300 микрон до 0,7 микрона
частота от 1 миллиона мегагерц до 0,4 миллиарда мегагерц.





Поднимаясь вверх по шкале частот, мы «перешагнули» «через одну ступеньку» — пропустили область частот, лежащих ниже светового диапазона: речь идет о так называемых *инфракрасных лучах.*

«Инфра» значит — «ни-

же». Частота инфракрасных волн ниже частот лучей видимого красного света. Инфракрасные лучи невидимы простым, невооруженным глазом. Они занимают полосу между миллиметровыми и световыми волнами — примерно от 0,4 миллиарда мегагерц до 1 миллиона мегагерц (длина волн от 0,7 микрона до 0,3 миллиметра).

Для локации волны эти оказались очень удобными. Чтобы их получать, не нужны специальные генераторы, так как все тела — это «передающие станции», излучающие в пространство инфракрасные тепловые лучи. Одни объекты излучают тепло, полученное от Солнца, другие — собственное тепло (тепло своей крови, тепло мотора и т. д.).

Локатору нужен только чувствительный приемник, и тогда он даже в кромешной тьме обнаружит присутствие этих тел.

IV.8

Всем знакомый рентгеновский аппарат использует волны короче волн светового диапазона еще в 10 тысяч раз (до стотысячных долей микрона).

Рекордно короткие волны, применяемые в электронной микроскопии, — волны в миллионные доли микрона.

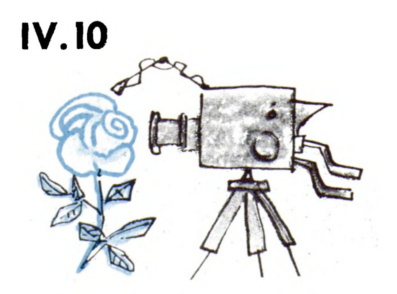


IV.9

Самые короткие и самые длинные из всех известных волн поставляет нам космос. Среди волн, приходящих из космоса, удалось обнаружить волны с длиной 30 миллионов километров. 100 секунд длится один период их колебаний. На расстоянии от Земли до Солнца уместится всего лишь пять таких волн.

В то же время космические лучи несут в себе колебания с длиной волны в 0,005 ангстрема (десятимиллионные доли микрона)!

IV.10



Для полноты картины стоит упомянуть, что согласно последним научным данным волны от 8 до 14 микрон являются «волнами запаха». Возможно, что в будущем, освоив такие волны, электроника сможет транспортировать запахи, как сейчас она транспортирует изображения или звуки.



От километра до долей микрона

Об истории электроники можно рассказывать много. Но главную ее суть можно выразить очень коротко: история электроники — это история укорочения волн.

Вспомним этапы развития радиосвязи. Сначала были освоены длинные волны *. Затем исследователи обнаружили, что короткие волны способны отскакивать рикошетом от неба и земли и таким способом можно передавать их вокруг всего земного шара. Занялись короткими волнами. За несколько лет удалось укоротить их раз в десять и во столько же раз увеличить частоту.

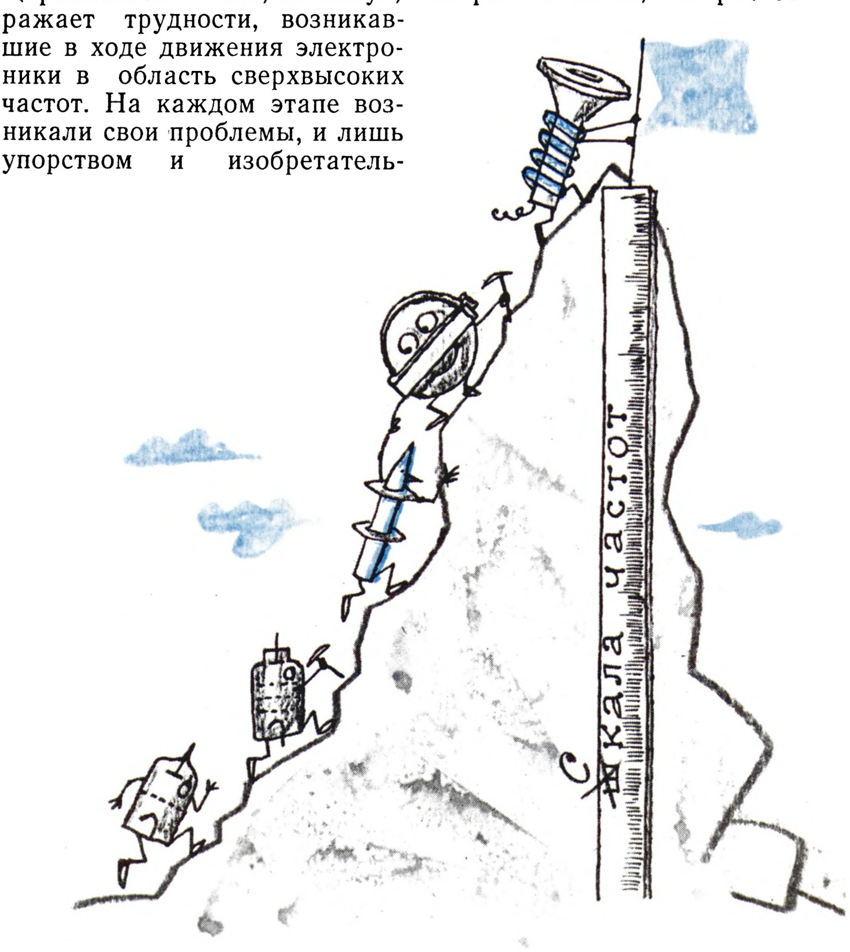
А тем временем родилось телевидение. Ему понадобились ультракороткие волны (УКВ). Опять пришлось в десять раз увеличивать частоту. И тут начались первые осложнения: при переходе на УКВ стал «выдыхаться» триод. Пришлось вводить в лампу дополнительные сетки: появились на свет тетроды и пентоды.

---

* Следует заметить, что радиоволны, полученные впервые Г. Герцем, имели длину порядка нескольких десятков сантиметров. Но эти волны возникали без помощи электронных приборов, а посредством искрового разряда, и на первых порах не нашли себе применения в радиосвязи.

Но эти трудности оказались всего лишь цветочками. Когда локация потребовала от электроники волн длиной до 3 сантиметров, всю аппаратуру пришлось разрабатывать заново. Здесь уже не могли работать лампы обычной конструкции, не годились и прежние радиоконтуры *LC*. И семья электронных приборов пополнилась новыми членами. Появились лампы, у которых вместо стеклянных баллонов мы видим сложную конфигурацию и комбинацию из керамики и металла. В лексиконе специалистов появились такие названия, как лампы маячкового типа и целый ряд еще более хитрых: клистрон, магнетрон, лампа с бегущей волной.

Такова судьба электроники: не зная покоя и передышек, она должна неустанно карабкаться вверх по шкале частот. Карабкаться — это, пожалуй, как раз то слово, которое отражает трудности, возникавшие в ходе движения электроники в область сверхвысоких частот. На каждом этапе возникали свои проблемы, и лишь упорством и изобретатель-



ностью специалистов всего мира можно объяснить тот факт, что, невзирая на все препятствия, из года в год неуклонно росла частота тех излучений, которыми электроника снабжала смежные отрасли для удовлетворения разных технических нужд.

Эта традиция жива и сегодня. На наших глазах сделан еще один огромный шаг в область высоких частот.

Используя вместо радиоконтура излучения атомов и молекул, та область техники, которую мы в самом начале книги назвали в шутку фотоникой, успешно осваивает волны длиной до десятых долей микрона.

Вот наглядные показатели успехов развития электроники.

За одну половину столетия она сумела «сжать» волны в несколько миллиардов раз и, начав с длины, измеряемой километрами, прийти к волнам с длиной в доли микрона.

Сколько весят короткие волны?

— Ну хорошо, — скажет читатель. — Может быть, повышать частоты и укорачивать волны и в самом деле было не просто. Но была ли нужда ставить перед собой такие задачи, а потом прилагать такие усилия для их решения? Обходилось же радио и без коротких волн!

Да, обходилось. Но дальность радиосвязи была ограниченной. А телевидение даже и на коротких дистанциях не могло обходиться без ультракоротких волн. Для передачи многих программ телевидения нужны еще более короткие волны. Почему? А вот почему.

Сигналы телевидения занимают широкую полосу частот: от нескольких герц до 6 мегагерц (см. III.41 и III.42). Когда с помощью модуляции этот сигнал накладывается на сигнал несущий, полоса расширяется вдвое и становится равной 12 мегагерцам.

Значит, если встает вопрос об одновременной передаче разных программ телевидения, то каждой программе надо выделить свой канал с полосой не менее 12 мегагерц.

Диапазон УКВ, на котором работает телевидение, занимает частоты от 50 до 300 мегагерц. Сколько программ можно передавать одновременно в этом диапазоне?

Расчет простой. Число программ равно числу каналов N, а

$$N = \frac{300 - 50}{12} \approx 20 \text{ программ},$$

Вроде достаточно, если телецентры работают на 2—3 программах. А вообще-то маловато. Если мы захотим создать, например, в городе сеть видеотелефонов, то весь диапазон УКВ займут всего лишь 20 видеоточек!

А сколько таких каналов можно выделить в сантиметровом диапазоне?

Давайте прикинем. Волнам с длиной от 3 до 10 сантиметров соответствует диапазон частот от 10 000 до 3000 мегагерц. Убедиться в этом не трудно: длина волны пересчитывается в частоты по формуле, приведенной на рисунке III.15.

Число телеканалов N подсчитывается так же:

$$N = \frac{10\,000 - 3000}{12} \approx 580.$$

Это уже значительно лучше. 580 видеотелефонов — это уже кое-какая видеосвязь.

Ну, а если количество точек в городе достигает десятков и сотен тысяч? Как тогда быть с видеосвязью?

Колебания с частотой ниже 50 мегагерц не смогут служить несущим сигналом: они исказят узор. А во всем диапазоне частот от 50 до 10 000 мегагерц (волны длиной от 6 метров до 3 сантиметров) уместится всего лишь:

$$N = \frac{10\,000 - 50}{12} \approx 830 \text{ программ.}$$

Где же взять десятки и сотни тысяч каналов, чтобы создать в городе всеобщую видеосвязь? Остается только одна возможность: укорачивать волны и дальше, повышать их частоту.

Но тут возникает весьма существенная заминка: когда длины волн сжимаются до долей миллиметра, приборы электроники «выдыхаются», подобно тому как еще на первом этапе укорочения стал «выдыхаться» триод. Как же быть? Навсегда расстаться с мечтой о видеотелефоне?

Нет, напротив! Ведь, помимо электроники, уже существует фотоника, и ей эта задача как раз по плечу.

Забегая вперед, скажем, что фотонные генераторы (лазеры) генерируют свет с длиной волны от 0,4 до 0,7 микрона (частоты от $4 \cdot 10^{14}$ до $7{,}5 \cdot 10^{14}$ колебаний в секунду, то есть от 0,4 до 0,75 миллиарда мегагерц).

Сколько программ телевидения уместится в этом диапазоне? Такой расчет мы теперь делать умеем:

$$N = \frac{(0{,}75 - 0{,}4) \cdot 10^9}{12} \approx 30 \text{ миллионов программ!}$$

300 световых диапазонов

Вот это уже масштаб! Но наш подъем по шкале частот был настолько стремителен, что едва ли читатель успел осознать все, что представилось его взору, когда мы достигли вершины — оптического диапазона частот.

Теперь можно, пожалуй, сделать короткую передышку и поразмыслить над тем, что нам повстречалось в пути.

Все световые волны, имеющие длину от 0,4 до 0,7 микрона, уместились на микроскопическом кусочке линейки. Длина кусочка составляет всего 3 десятитысячных миллиметра. На острие бритвы уместится почти 300 таких кусочков. А в каждом кусочке умещается 30 миллионов телевизионных программ!

В то же время во всем радиодиапазоне с длинами волн от 1 до 2000 метров (двух километров!) едва размещается каких-нибудь 20 телепрограмм! На первый взгляд это кажется парадоксом.

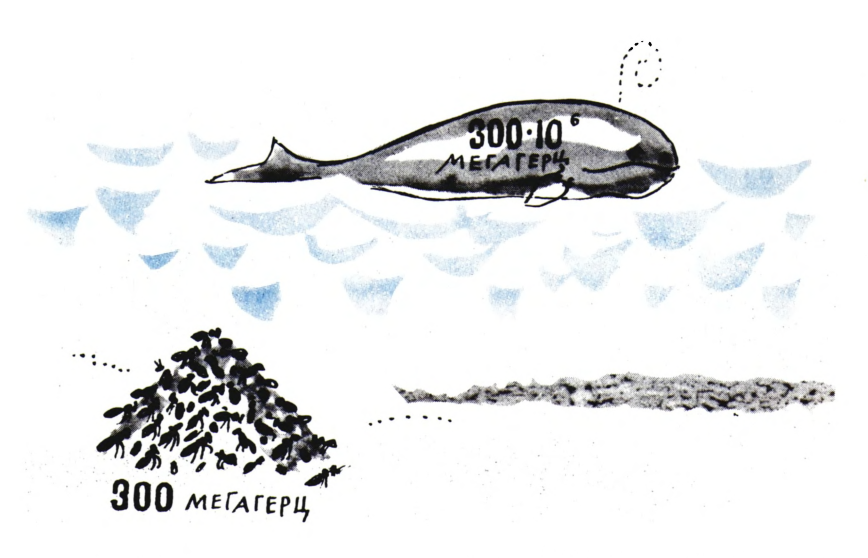
Вот микроскопический отрезок линейки размером в 0,3 микрона. В нем уместились все световые волны. А вот длинный путь, который начался на расстоянии 1 метра от порога вашего дома, а кончился на другой улице через две троллейбусные остановки. На этом пути укладываются длины всех используемых радиоволн.

Так почему же в ничтожно малом отрезке информации уместилось в миллион раз больше, чем на пути в 2 километра длиной?

А объяснение тут простое. Когда оценивают спектры сигналов и полосу тех каналов, по которым передаются сигналы, то используют не шкалу длин волн, а шкалу частот.

Пользуясь формулой III.16, легко убедиться, что самой





длинной волне радиодиапазона ($\lambda = 2000$ метров) соответствует частота 0,15 мегагерца, или 150 килогерц.

Самой длинной волне светового диапазона ($\lambda = 0{,}7$ микрона) соответствует частота $0{,}45 \cdot 10^9$ мегагерц (0,45 миллиарда мегагерц). Частота эта больше, чем частота сигнала с длиной волны в 2000 метров, в $3 \cdot 10^9$ раз.

Примерно во столько же раз муравей (вес около 3 миллиграммов, или 3 тысячных грамма) легче среднего кашалота (вес около 10 тонн).

Но здесь следует еще раз уточнить одно обстоятельство. Быть может, многим покажется странным, что «кашалотом» оказались не те волны, длина которых измеряется километрами, а волны с длиной в доли микрона. Кашалота и муравья мы сравниваем не по размеру, а только по весу. А «вес» радиоволн растет с ростом их частоты.

Верхняя частота света примерно в два раза выше, чем нижняя, она равна $0{,}75 \cdot 10^9$ мегагерц. Световой диапазон, то есть отрезок шкалы между верхней и нижней частотами, составит:

$0{,}75 \cdot 10^9 - 0{,}4 \cdot 10^9 \approx 0{,}3 \cdot 10^9$ мегагерц $= 300 \cdot 10^6$ мегагерц.

А в диапазоне радиосвязи верхняя частота выше, чем нижняя, не в два раза, а в 2000 раз. И, несмотря на это, диапазон частот значительно у́же. Он составляет всего лишь $300 - 0{,}15 = 298{,}85$ мегагерца, то есть примерно 300 мегагерц.

И ничего здесь нет удивительного. Два кашалота весят на 10 тонн больше, чем один. А 2000 муравьев тяжелее одного муравья всего лишь на $3 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 - 3 \cdot 10^{-3} = 5{,}99$ грамма!

Так и с радиоволнами. Сравнив ширину диапазона радиосвязи (300 мегагерц) с шириной светового диапазона ($300 \cdot 10^6$ мегагерц), мы еще раз убеждаемся, что диапазон радиосвязи «весит» меньше оптического диапазона в миллион (10^6) раз!

Проблема узких лучей

Вот теперь ясно, почему электроника стремилась любой ценой укорачивать волны. Только на самых коротеньких волнах открывается для связи и передачи любой информации самый большой простор.

Диапазон коротких, средних и длинных волн уже давно стал тесен для радиосвязи. Теперь телевидению тоже становится тесно на УКВ. Поэтому радиосвязь в последнее время интенсивно осваивает сантиметровые волны, а телевидение, очевидно, переберется со временем в световой диапазон. Здесь ему будет значительно просторнее. Один только красный цвет имеет столько «оттенков», что жители целого города смогут, не мешая друг другу, обмениваться своими изображениями по видеотелефонам на одних лишь красных лучах.

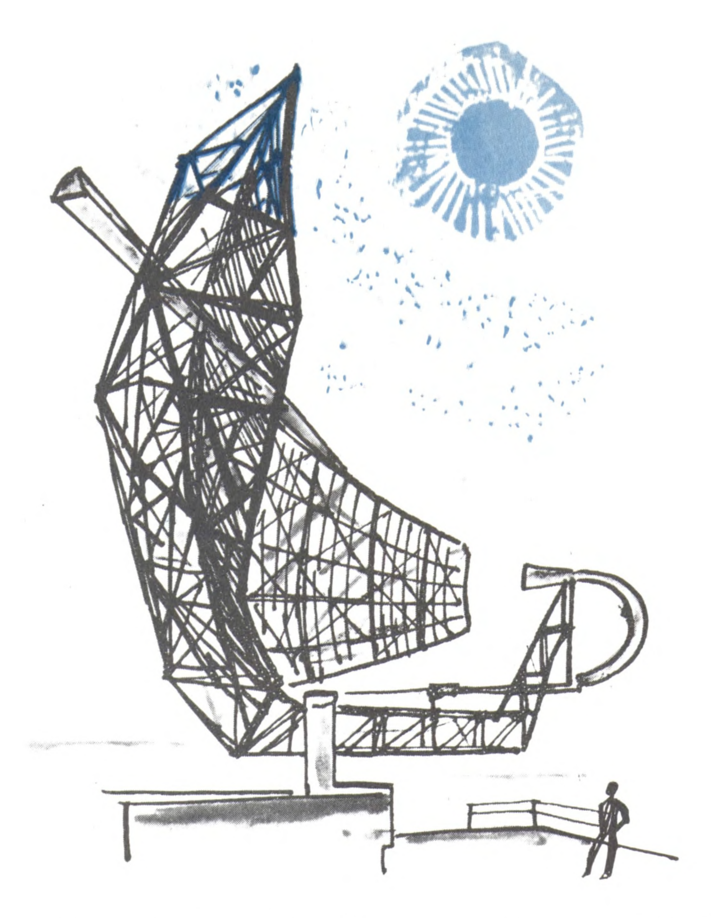
«Теснота» — весьма существенный фактор, заставляющий электронику укорачивать волны. Но есть и другая причина, причем не менее важная. Для решения целого ряда задач необходима направленность излучений: волны должны излучаться антенной не во все стороны, а в одном направлении узким лучом.

Особенно остро этот вопрос был поставлен локацией. По лучу можно определить точное положение отражающего объекта. Золотой петушок из известной сказки А. С. Пушкина поворачивал голову в ту сторону, откуда шло чужеземное войско. Радиолокационная станция указывает направление на цель противника поворотом своих антенн. Направление будет указано точно, если антенна станции излучает волны узким лучом.

А создать такой луч можно только в том случае, если размеры антенны будут значительно больше, чем длина излучаемых волн.

Первые радиолокационные станции (это было в начале 40-х годов) собирали в луч метровые волны с помощью огромных антенн.

Луч нащупывал в небе самолет противника и указывал, куда направить снаряд. Долго мириться с таким положением летчики не могли. Необходимо было как можно скорее снаб-



дить локаторами и авиацию. Только как это сделать? Ведь антенну с размерами двухэтажного дома не взгромоздишь на самолет! Однако можно во много раз уменьшить антенну и в то же время не нарушать условия направленного излучения, согласно которому размеры антенн должны быть много больше длины излучаемых волн. Эту задачу надо решать от противного — уменьшать длину волн.

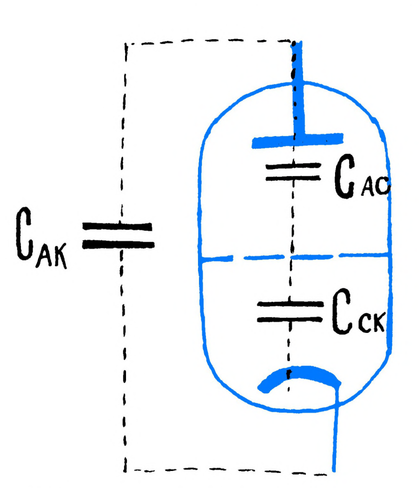
Когда длину волн укоротили до сантиметров, появилась возможность создания компактных и эффективных самолетных антенн.

Какой ценой добывались сантиметровые волны, мы расскажем несколько позже. А сейчас вернемся к тому этапу истории электроники, когда развитие телевидения и дальней радиосвязи потребовало от электроники освоения коротких и ультракоротких волн.

Сетки начали размножаться

На первом этапе развития радиосвязи триод выручал электронику во всех случаях жизни: он помогал генерировать переменные токи и напряжения, которые легко превращались в волны, усиливать, модулировать, детектировать, переводить сигналы на промежуточные частоты — в общем производить все те операции, без которых нельзя обеспечить радиосвязь. Но когда жизнь потребовала освоения ультракоротких волн, вскрылся тот недостаток триодов, который был незаметен для более низких частот. Дело в том, что электроды триода (анод, катод, сетка) — это те же обкладки, между которыми есть определенные емкости $C_{АС}$; $C_{СК}$; $C_{АК}$.

Вы помните: сигнал пройдет через емкость тем легче, чем выше его частота (см. III.25). С переходом на короткие и ультракороткие волны частоты стали очень высокими. Поэтому емкость между анодом и сеткой, не играющая никакой роли, когда лампа работает на низких частотах, превратилась в легкопроходимый мостик для высоких частот. По этому мостику часть энергии передается с анода на сетку триода. В генераторе на триоде такой «мостик» сооружался специально. А если триод должен работать как усилитель, то от этого «мостика» нет ничего, кроме вреда. Насколько такая связь нежелательна, можно судить по той кличке, какую дали ей специалисты, — ее стали называть паразитной связью. Из-за нее на высоких частотах триодные усилители генерируют собственные частоты, вместо того чтобы усиливать приходящий сигнал.



Как же разрушить этот опасный «мостик» и разорвать паразитную связь?

Можно уменьшить емкость между анодом и сеткой, уменьшая их размеры или отодвигая их друг от друга подальше (см. III. 21). Но и то и другое ухудшает электрические характеристики ламп.

Конструкторы нашли другой выход из положения. Они ввели в лампу еще одну сетку и подали на нее положительный потенциал. Вокруг второй сетки возникло поле, которое

стало противодействовать току, текущему через паразитную связь.

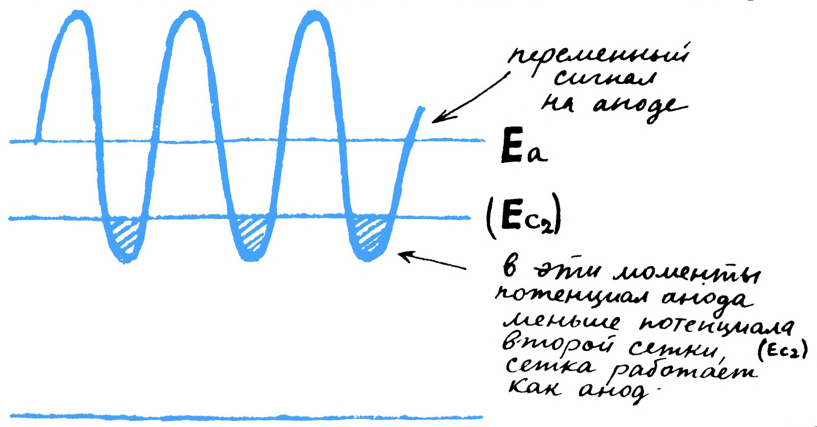
Так появились тетроды — лампы с четырьмя электродами («тетра» по-латыни — «четыре»). Они позволили конструировать усилители, рассчитанные на усиление сигналов с частотами до десятков мегагерц, не опасаясь, что такой усилитель в один прекрасный момент начнет сам возбуждаться, то есть генерировать собственный, паразитный сигнал. Казалось бы, создатели ламп справились с первой трудностью, вызванной переходом на ультракороткие волны.

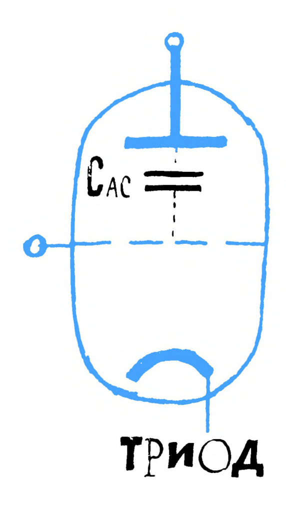
Как бы не так! Когда стали работать с тетродами, то обнаружили новую неприятность — динатронный эффект.

Три вместо одной

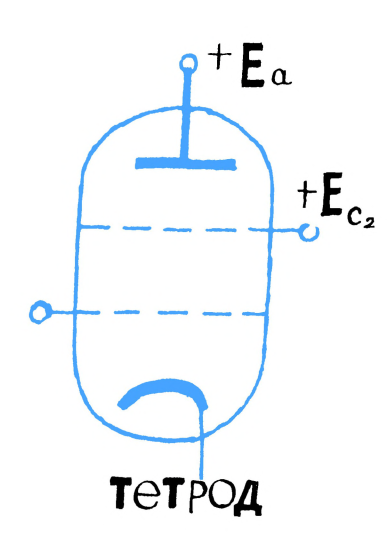
Динатронный эффект возникает так. Поскольку анод сделан из металла, в нем существует «электронная жидкость» — свободные электроны, перемещающиеся между атомами решетки (см. I.10). Под ударами электронов, прилетевших с катода, некоторые свободные электроны «выплескиваются» из анода наружу. Возникает процесс вторичной эмиссии (первичной эмиссией обладает катод).

Вторая сетка тетрода обладает тоже положительным потенциалом, значит часть электронов, выбитых из анода, устремляется к ней. Особенно сильным этот поток становится в те моменты, когда на анод действует отрицательная полуволна переменного тока. В эти моменты потенциал второй сетки оказывается выше потенциала анода, лампа от этого рабо-





тает как бы «вверх тормашками»: вторая сетка начинает притягивать электроны подобно аноду, а сам анод выступает в роли катода, излучающего за счет вторичной эмиссии нежелательный электронный поток. Этот поток зависит от анодного напряжения, меняется он с частотой анодного тока и искажает усиливаемый сигнал. Почему этот эффект проявил себя только в тетродах? Разве в триоде электроны не ударялись о поверхность анода? Разве там не было вторичной эмиссии?

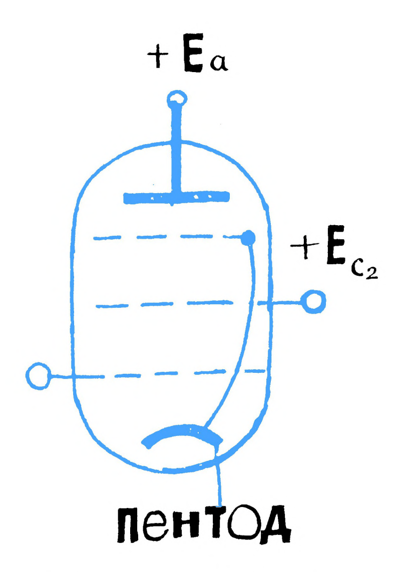


Все это было. Но в триоде электроны вторичной эмиссии никому не мешали, и потому никто их не замечал. В самом деле, «выплеснулся» электрон из анода, а лететь-то ему дальше и некуда, потому что, кроме анода, в триоде нет других электродов, имеющих положительный потенциал, и некому его притягивать. Под действием поля анода электрон вынужден вновь упасть на анод. Вот почему до введения в лампу второй сетки эффект вторичной эмиссии никого, в сущности, не волновал. А в тетроде он превратился в проблему, в препятствие, которое нужно было немедленно устранить.

Устранить его помогла третья (антидинатронная) сетка, преградившая электронам вторичной эмиссии путь от анода к положительно заряженной сетке и породившая пятиэлектродную лампу — пентод.

Пентод помог радиосвязи усиливать короткие волны. В частности, с его помощью можно усилить сигнал, на котором записан телевизионный кадр. А все потому, что с по-

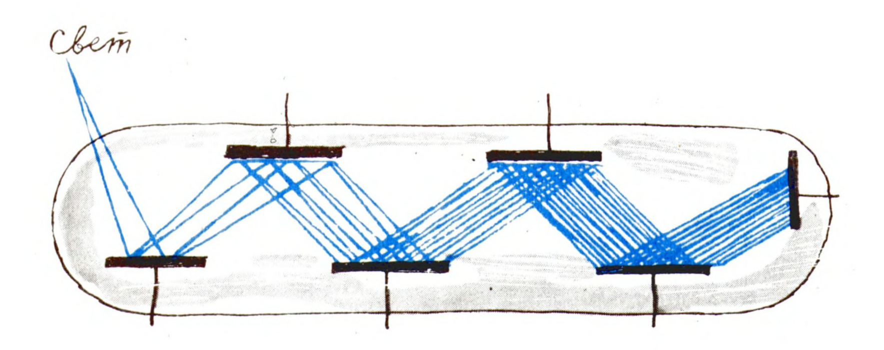
мощью третьей сетки удалось ликвидировать порожденный вторичной эмиссией вредный динатронный эффект.



Заметим попутно, что электроникой созданы и такие устройства, в которых за счет вторичной эмиссии получают очень полезный эффект.

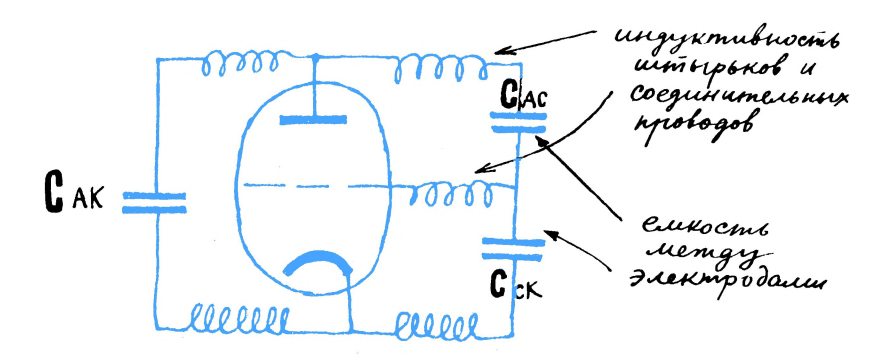
Поток электронов, возникающий под действием света за счет внешнего фотоэффекта, обычно бывает слабым. Но, направив этот поток на другой специальный электрод, можно получить за счет его вторичной эмиссии более сильный поток. Затем электроны вторичной эмиссии направляются к третьему электроду, который под действием «бомбардировки» вновь излучает электроны вторичной эмиссии. Их направляют к четвертому электроду и т. д. Получается «лавина», и на каждом этапе она становится все мощнее. Выходит, что несколько «камешков» — электронов, выбитых светом из первого электрода, благодаря вторичной эмиссии нескольких установленных по дороге анодов породили целый «обвал».

Так действуют фотоэлектронные умножители, позволяющие превращать маленький ток, возникший под действием фотоэффекта, в мощный сигнал.



Причины второго кризиса

Болезнь роста — явление неизбежное. Любая область науки и техники в ходе развития переживает ряд кризисов, во время которых приходится основательно пересматривать прежние методы и идеи.

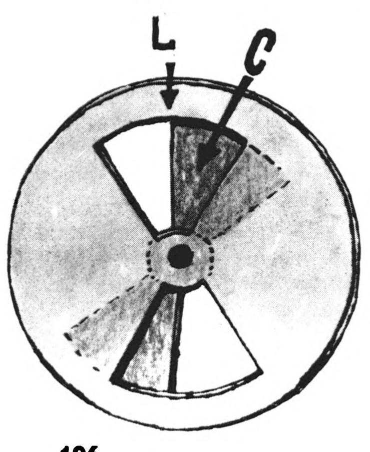


Результатом первого кризиса, пережитого электроникой, было рождение многосеточных ламп.

Второй кризис наступил в тот момент, когда локация выдвинула задачу освоения сантиметровых волн.

В чем причина этого кризиса?

Вспомним простой колебательный контур LC. Собственная частота его будет тем меньше, чем больше величина емкости C и индуктивности L (см. III.7). Но в схеме триодного генератора, куда включен наш колебательный контур, помимо емкости контура, существуют уже знакомые нам «паразиты»: емкости C_{AK}; C_{CK} и C_{AC}. И если влияние «паразитов» сказывалось даже на ультракоротких (метровых) волнах, то что же говорить о волнах, которые стали короче еще в 100 раз! Здесь «паразитом» становится любая деталь не только электронной схемы, но и самой лампы. Коротенький кусочек провода начинает работать, как антенна, потому что его длина соизмерима с длиной сантиметровых волн.



Штырек лампы (ножка), через который подводится напряжение к электродам, тоже становится «паразитом»: он обладает индуктивностью, весьма ощутимой для столь высоких частот. А вместе с межэлектродными емкостями штырьки образуют паразитные контуры.

Лампа вся «обросла паразитами», каждый из которых обладает своей частотой резонанса и не дает генератору вырабатывать нужную частоту. Да и не так-то просто настроить анодный контур на частоту, скажем, 10 000 мегагерц. Чтобы повысить его частоту, надо уменьшить емкость и индуктивность. Можно совсем отключить емкость и размотать катушку, оставив всего два-три витка. От контура, по существу, уже ничего не останется, и все же за счет влияния «паразитов» собственная частота его колебаний будет намного ниже 10 000 мегагерц. Например, для волн от 30 сантиметров до нескольких метров (то есть для частот ниже 1000 мегагерц) был создан контур, получивший название контура-бабочки. Крылья бабочки создают малую емкость. А вместо катушки осталась короткая перемычка — всего лишь один неполный виток!

И все-таки частота собственных колебаний здесь еще недостаточна; чтобы генерировать сантиметровые волны, надо поднять частоту резонанса еще в 10 раз!

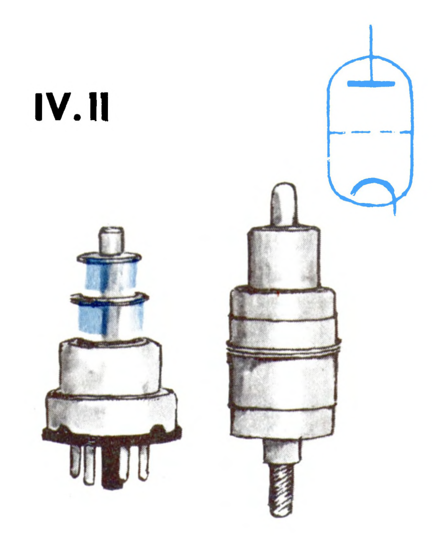
Много изобретательности пришлось проявить специалистам. И в результате этих усилий был, наконец, создан... триод.

Да, да, не удивляйтесь, не тетрод или пентод, а триод. Но этот триод был создан специально для сверхвысоких частот (СВЧ) и лишь отдаленно напоминал прежний низкочастотный триод.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

IV.11

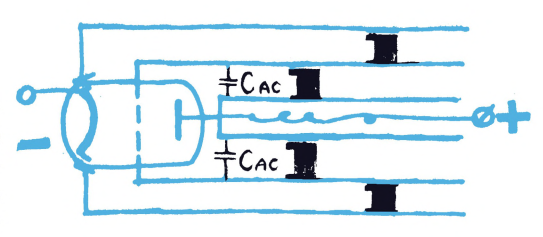


Перед вами два представителя большого семейства электронных приборов, предназначенных для сверхвысоких частот (СВЧ). Внутри этих ламп можно найти все элементы обычных триодов: анод, катод, сетку, накал. Зато по внешнему виду они совсем не похожи на прежние лампы. Да и внутри есть немало отличий от прежних триодов.

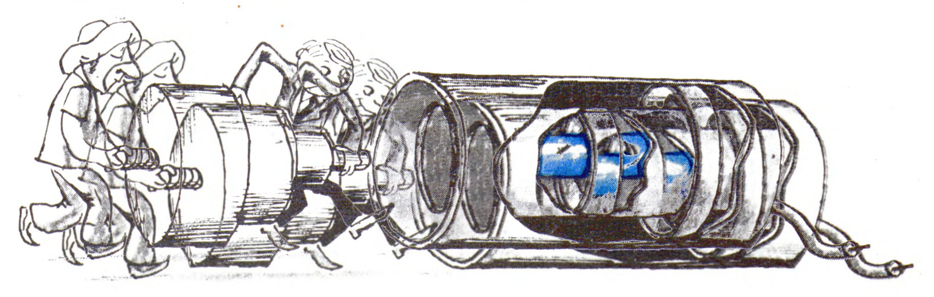
Баллон правой лампы представляет собой набор металлических цилиндров, а торцы закрыты керамикой. Эти лампы носят название металлокерамических.

У левой лампы — маячковой — баллон состоит из нескольких ярусов и напоминает по форме маяк. Причудливость форм СВЧ-триодов станет вполне понятной после того, как мы познакомимся с СВЧ-генераторами, в которых используются упомянутые триоды.

IV. 12



В генераторе на маячковом триоде вы не найдете обычного контура, состоящего из элементов LC. Здесь контуры по форме напоминают стаканы и крепятся прямо к дисковым выводам лампы. Лампа как бы сливается с контуром, поэтому мы не увидим штырьков, а стало быть, нет и их индуктивности. Что же касается паразитной емкости (например, C_{AC}), то она подключается к контуру и становится частью его самого.



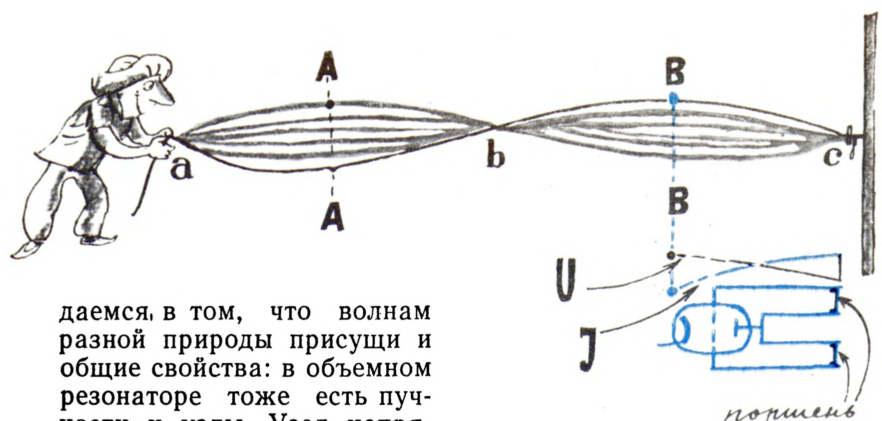
IV. 13

Контуры подобного типа называют *объемными резонаторами*. В них возникают стоячие волны.

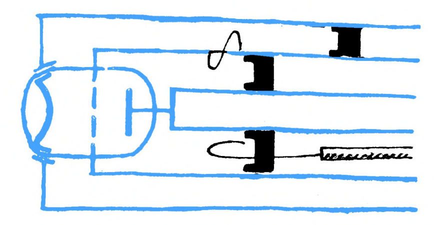
Некоторым подобием этих волн являются колебания, которые возникнут в веревке, если один конец ее прикрепить к стенке, а взявшись рукой за другой, начать равномерно его перемещать вверх-вниз. Волна добежит до стенки, отразится и начнет возвращаться обратно. А навстречу ей бежит новый гребень волны. В результате сложения волн прямой и отраженной на веревке возникнут стоячие волны. В одних местах *(AA, BB)* образуются пучности: здесь веревка колеблется с наибольшим размахом. А другие точки *(а, в, с)* стоят без движения, несмотря на наличие волн: их называют узлами стоячей волны (см. стр. 200). Точка *с*, в которой мы закрепили веревку, будет первым узлом.

Волны объемного резонатора имеют, конечно, другую природу: здесь происходят колебания магнитных и электрических сил.

Но мы еще раз убеж-



даемся в том, что волнам разной природы присущи и общие свойства: в объемном резонаторе тоже есть пучности и узлы. Узел напряжения возникнет там, где стоит замыкающий поршень. Ведь поршень — это короткое замыкание: в этом месте сопротивление (а значит, и напряжение) будет равно нулю (см. кривую напряжения *U*). Но там, где мало́ сопротивление, велика сила тока. Поэтому пучность тока возникнет именно здесь (см. кривую *J*). При перемещении поршня вместе с ним смещается узел напряжения и пучность тока — изменяется длина стоячей волны.



IV.14

Для генерации колебаний необходима обратная связь. Эту связь создают с помощью специальной петли, передающей энергию из анодного контура в сеточный контур.

Другая петля позволяет отобрать часть энергии колебаний анодного контура, чтобы передать ее антенне и излучить в эфир.

Там, где есть пучность тока (то есть у поршня), велико и магнитное поле. Поэтому именно здесь и ставят петлю.

Ту же энергию можно отобрать через емкость. Емкость должна размещаться как можно ближе к пучности напряжения, то есть в месте сосредоточения электрических сил.

Перемещением поршня влево и вправо изменяют длину стоячих волн, осуществляя тем самым настройку генератора на нужную частоту.

Большая заслуга в разработке теории объемных резонаторов принадлежит советскому ученому М. С. Нейману.

Электроны слишком медлительны

По одному лишь внешнему виду нового генератора можно судить о том, насколько трудным орешком оказался диапазон СВЧ. Все пришлось разрабатывать заново: и схемы, и лампы, и контуры.

Казалось бы, в новой конструкции ламп все предусмотрено. И тем не менее генератор на этих лампах не может дать частоту хотя бы 3000 мегагерц. Длина волны при такой частоте равна 10 сантиметрам. А локация требует, чтобы волны стали короче еще раза в три. Ей нужны волны длиною в 3 сантиметра, то есть частоты вплоть до 10 000 мегагерц. На таких частотах не могут работать и новые лампы, хотя их создавали специально для сверхвысоких частот. Но почему? Ведь лампа и контуры представляют собой единое целое, а паразитные емкости, которые раньше были помехой, теперь как бы влились в контуры. Нет индуктивностей — штырьки превратились в диски, а диски тоже слились с контурами. Что же теперь мешает получить колебания самых высоких частот?

А мешает одно обстоятельство: в этих лампах электрон, излученный катодом, слишком долго летит на анод. Что же случилось здесь с электроном? Куда девались его подвижность и легкость, которые восхищали нас раньше буквально на каждом шагу?



Электрон остался таким же подвижным. И время его перелета от катода к аноду составляет всего лишь одну десятимиллиардную долю секунды — оно короче микросекунды в 10 000 раз. Но в диапазоне СВЧ-колебаний решающее значение приобретают и миллиардные доли секунды.

Дело в том, что как раз такое же время (одну десятимиллиардную долю секунды) длится полный цикл колебаний частоты 10 000 мегагерц. Пока электрон летит от катода к аноду, напряжение в контуре успевает достичь наибольших значений, упасть и вновь нарасти. Значит, и в самом деле по сравнению со скоростью изменения напряжения электрон летит достаточно долго. Даже он оказался слишком медлительным для таких высоких частот. В наших привычных масштабах времени десятимиллиардную долю секунды не назовешь даже мигом. Но для ламп СВЧ этот миг слишком долог — они ощущают время гораздо тоньше, чем мы.

Как уменьшить время пролета? Казалось бы, просто — сократить электрону путь. Так, собственно, и поступили. В триодах, созданных для СВЧ-колебаний, в зазоре, соизмеримом с толщиной лезвия бритвы, умудрились разместить катод, сетку, анод. Невольно вспомнишь о мастере, который был воспет в свое время Лесковым за то, что сумел подковать блоху!

Но дело тут даже не в трудностях изготовления. Современный Левша смог бы сделать зазор и поменьше, если бы это не ухудшало качества ламп.

Напряжение на аноде лампы высокое. Если катод слишком близок к аноду, между ними может возникнуть искра. Надо учесть и другую опасность: чем ближе сдвинуты электроды, тем больше величина паразитной емкости (см. III.21). А при большой паразитной емкости перестают работать даже объемные контуры. Как же выйти из положения? Раздвинешь электроды — увеличится время пролета. Приблизишь — возрастет паразитная емкость.

Вот уж действительно кризис! Настоящий заколдованный круг!

Может быть, попробовать при малом зазоре уменьшать площадь сетки, анода и катода? Тогда емкость уменьшится, а время пролета не возрастет. Нет, и это тоже не выход.

Катод с малой поверхностью не даст достаточного количества электронов! Анод малой площади не пропустит достаточный ток!

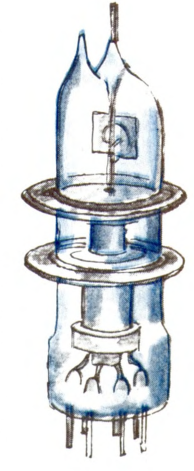
Все это учли при создании металлокерамических и маячковых триодов. Вес размеры здесь не случайны. Нельзя больше сближать электроды — начнет мешать паразитная емкость. Нельзя уменьшать их площадь — в лампе уменьшится ток, она получится маломощной. А локация требует мощных импульсов. Поэтому эти триоды стали использовать для усиления и генерации волн длиннее 10 сантиметров. Для создания же волн длиной в 3 сантиметра пришлось искать новые пути.

Контур в качестве светофора

В первых конструкциях СВЧ-генераторов контур слился с электронной лампой. А нельзя ли пойти еще дальше — создать такую конструкцию, в которой контур станет частью самой электронной лампы? Оказывается, можно. Именно так и устроены генераторы волн длиной в 3 сантиметра — магнетрон и клистрон.

В клистроне вновь нашла применение знакомая нам электронная пушка. Электронный луч пронизывает пространство внутри клистрона и упирается в коллектор-электрод, на который подан положительный потенциал. На пути луча установлены два резонансных контура. Они похожи на бублики. Дырки «бубликов» затянуты сетками, через которые может свободно пройти электрон. Внутри «бубликов» — переменное поле, — те же самые стоячие волны, что и в контурах IV. 12 и IV. 13.

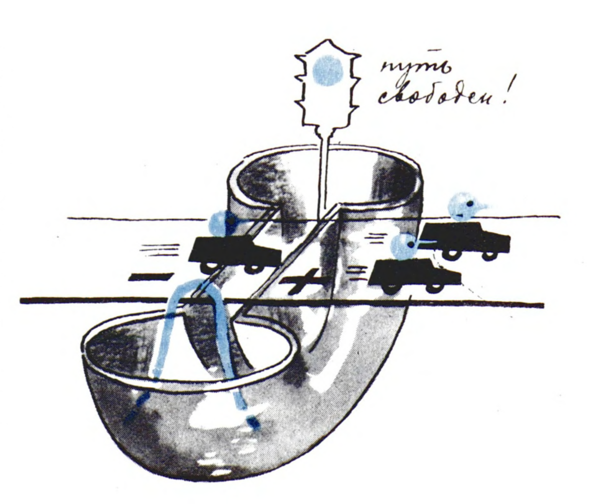
Оба контура настроены на волну 3 сантиметра, то есть на частоту 10 000 мегагерц.

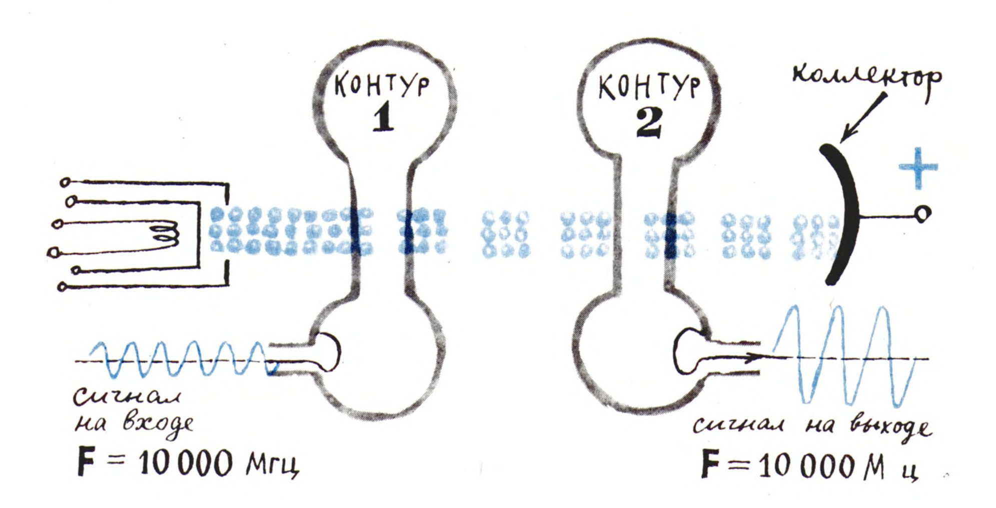


По дороге от старта до финиша электрон встретит сначала контур № 1. С помощью петли сюда подводится энергия колебаний с частотой 10 000 мегагерц. В течение каждого периода колебания эти по-разному действуют на электроны. В луче возникнут сгустки и разрежения.

Нечто подобное происходит с автомашинами, идущими по Садовому кольцу Москвы и по другим магистралям, где установлено автоматическое регулирование движения автомашин. Пока нет красного света — жми на полную скорость, догоняй тех, кто впереди. Ну, а уж если не повезло, не сумел проскочить до красного света — тормози и жди, пока догонят другие. Когда вновь зажжется

зеленый свет светофора, можно следовать дальше в составе возникшего у красного света «сгустка» автомашин. Пройдя через несколько светофоров, все машины распределятся по группам — одни подождут у светофора едущих сзади, другие догонят тех, кто был впереди.

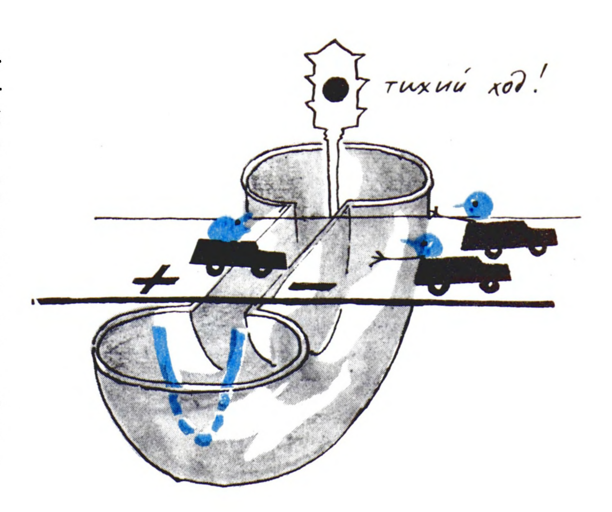


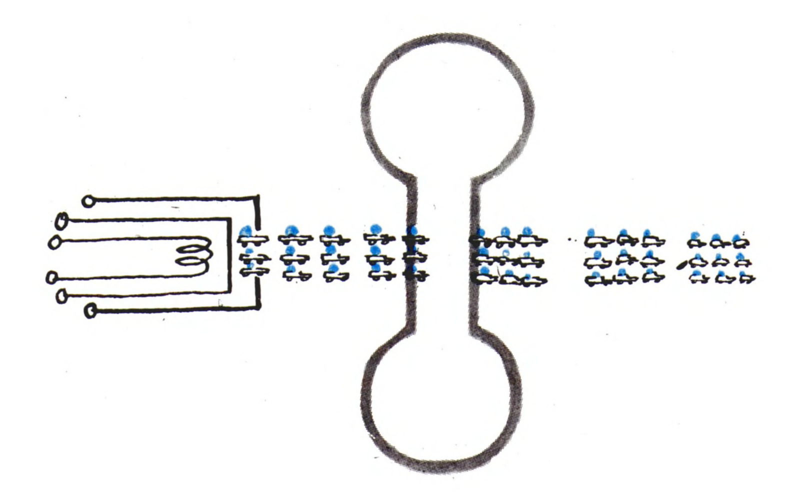


В клистроне почти то же самое: электроны — это автомобили, а контур действует как светофор. Но светофор лишь подает сигналы, а шоферы по этим сигналам регулируют скорость машин. В клистроне иначе. Контур сам регулирует скорость: электроны, летящие сквозь его сетки, то ускоряются, то тормозятся в зависимости от того, какая полуволна напряжения действует в контуре в данный момент.

Если на правой сетке контура № 1 будет «плюс», а на левой «минус», электрическое поле ускорит находящийся

между сетками электрон. В следующий момент знаки на сетках сменились, а электрону, оказавшемуся в этот момент между сетками, придется убавить скорость — поле будет его тормозить. В результате — сгустки и разрежения электронов почти такие же, как на Садовом кольце.

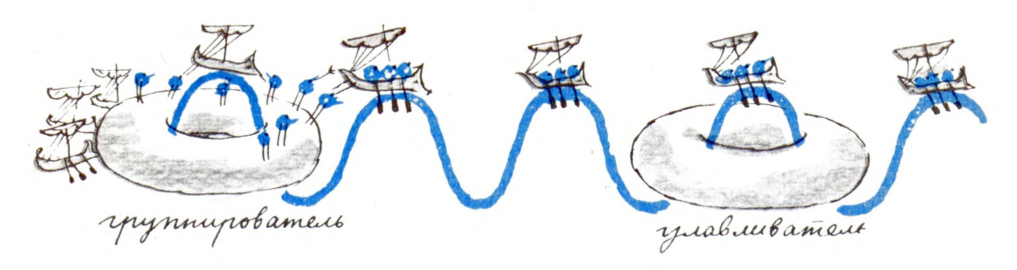




Клистрон — это морской прибой

Слово «клистрон» электроника заимствовала у греков. Оно означает — «морской прибой».

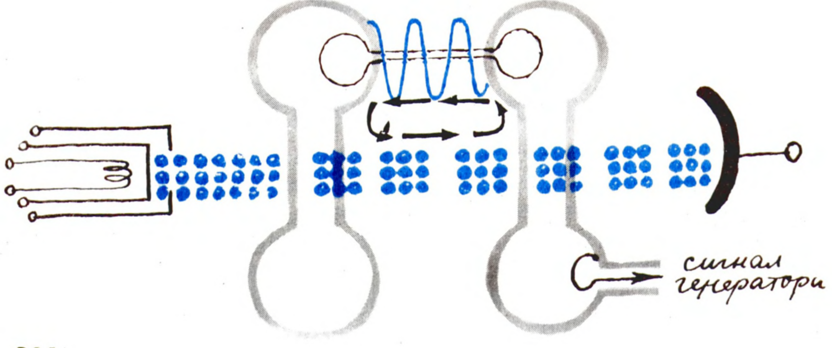
Название этого прибора хорошо отражает принцип его работы. Электроны, собранные первым контуром в группы, на второй контур сами действуют так же, как морской прибой на плавучий причал. Мимо контура № 2 друг за другом



идут электронные «сгустки», и от каждого из них контур № 2 испытывает толчок. Сколько таких толчков повторится в течение каждой секунды?

Группы возникают у контура № 1 — «светофора». Сигналами светофора служат подведенные к контуру № 1 электрические колебания. Зеленый сигнал «светофора» (то есть ускоряющая полуволна напряжения) сменяется красным (тормозящей полуволной) с частотой 10 000 мегагерц. Значит, с такой частотой следуют «сгустки» и разрежения. Эти «волны морского прибоя» толкают второй контур (его называют улавливателем) 10 000 000 000 раз в секунду, в такт с его собственной частотой.

Итак, электрические колебания, подведенные к первому контуру (он назван группирователем), через поток электронов передаются второму контуру, причем оба контура настроены в резонанс. Колебания во втором контуре будут иметь значительно бо̀льшую амплитуду. Ведь они рождены электронами, а электроны предварительно приобретают большую энергию от постоянного поля. Это поле, рожденное и сформированное коллектором и ускоряющими электродами «электронной пушки», разгоняет электроны до очень больших скоростей. В этом смысле клистрон подобен любым другим усилителям: за счет энергии источника постоянного тока производится усиление колебаний.



Усилитель легко превратить в генератор: надо создать обратную связь. Если связать петлей улавливатель и группирователь, часть энергии колебаний улавливателя по цепи обратной связи возвратится назад. Группирователю этой энергии будет достаточно для создания сгустков, и внутри клистрона возникнет «морской прибой». Волны прибоя будут раскачивать контур-улавливатель, часть энергии колебаний вновь передастся в группирователь — образуется неразрывный замкнутый круг. Клистрон начнет генерировать. Частота генерации будет равна собственной частоте контуров.

Чтобы связать между собой контур-улавливатель и контур-группирователь, пришлось вводить специальные петли. А почему бы энергии группирователя не просочиться в отверстия сетки? Если сквозь эти отверстия прошел весь поток электронов, то почему не пройти электромагнитной волне?

Секрет в том, что здесь возникают волны с длиной порядка 3 сантиметров, а отверстия в сетке имеют гораздо меньший размер. Волна «не заметит» таких небольших отверстий. Если бы волны и электроны обладали способностью видеть, то электронам сетка представилась бы прозрачной, а волнам — в виде глухой стены.

Время стало необходимым

Частоты порядка 10 000 мегагерц оказались не под силу триоду. Зато с ними очень легко сладил клистрон. Почему? Опять разговор про время пролета, про тот миг, когда электрон улетел с катода, но еще не успел попасть на анод.

С переходом на диапазон СВЧ триод изменил свой облик. В новой конструкции удалось избавиться от неприятностей, связанных с влиянием паразитных индуктивностей и емкостей. Но осталось большое время пролета — глубоко спрятанный, внутренний, неизлечимый порок.

Как же этот вопрос разрешен в клистроне? Весьма своеобразно: если в триоде время пролета являлось пороком, то клистрон без него просто бы не смог обойтись. Ведь в течение этого мига и должны совершиться процессы, на которых основана вся работа клистрона. За то время, пока электроны летят, они должны успеть разбиться на группы и возбудить по дороге улавливатель, из которого и извлекается усиленный, мощный сигнал.

А как быть с паразитной емкостью? Ведь в контурах

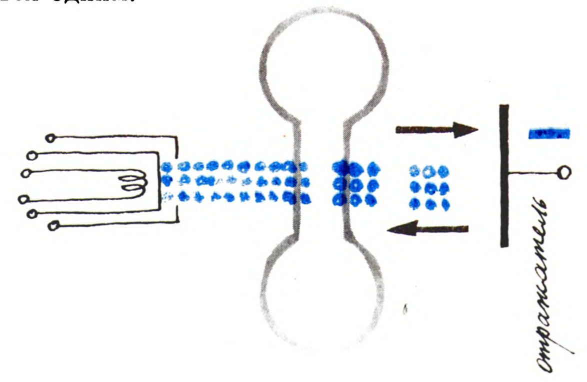
имеются сетки, сквозь которые летят электроны. Если сетки придвинуть близко друг к другу, они образуют большую емкость. Может случиться так, что из-за этой емкости не удастся настроить контур на частоту 10 000 мегагерц. Значит, сетки нужно раздвинуть. Путь между сетками станет длиннее, время пролета — тоже.

Интересная картина сложится, если время пролета между этими сетками станет равным периоду СВЧ-колебаний... Пока электрон летит между сетками, положительную полуволну колебаний сменит отрицательная. И волна, сначала подгонявшая электрон, затем станет его тормозить. Рывок, торможение, рывок, торможение — и вот все электроны летят уже одним непрерывным потоком, и нет никаких групп. Будто светофор мигнул на мгновение красным светом и снова включил зеленый, пропуская мимо потоки автомашин.

Как же выйти из положения? Сдвинешь сетки — получишь большую емкость. Раздвинешь подальше — контур не сможет группировать.

Выручает одно обстоятельство. Дело в том, что «электронная пушка» клистрона разгоняет электроны до очень больших скоростей. Общее время пролета остается при этом значительным — ведь от катода к коллектору ведет весьма длинный путь. Но малый участок пути между сетками электрон проходит очень быстро, даже в том случае, если сетки раздвинуты далеко. Значит, можно смело раздвинуть сетки и, уменьшив тем самым вредную емкость, работать с сигналами вплоть до самых высоких частот.

Опять преимущества за клистроном, еще раз триод должен признаться, что в области СВЧ-колебаний ему с клистроном тягаться не след. Особенно после того, как клистрон при генерации СВЧ-колебаний вместо двух контуров стал обходиться одним.



В этом клистроне (он называется отражательным) воплощена такая идея: если для генерации все равно приходится связывать с помощью петли контур-улавливатель и контур-группирователь, то нельзя ли заставить один и тот же контур и улавливать и группировать?

Так и сделали. С помощью контура стали сбивать электроны в «сгустки» и заставили их лететь к отражателю — электроду, имеющему отрицательный потенциал. Вокруг отражателя существует поле, от которого электроны отскакивают, словно от стенки горох. Отскочив, летят обратно и все теми же сгустками возвращаются к контуру и отдают ему энергию в виде следующих друг за другом толчков.

Частота толчков (а следовательно, и частота генерации) обязательно совпадает с собственной частотой и резонансного контура, потому что контур этот совместил в себе сразу все функции: и группировку, и улавливание энергии, и обратную связь.

Первые образцы отражательного клистрона были созданы в 1941 году В. Ф. Коваленко. Независимо от него аналогичную конструкцию создали Н. Д. Девятков и И. В. Пискунов.

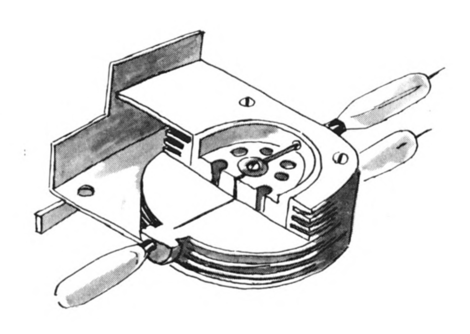
А общая идея клистрона родилась значительно раньше: ее предложил в 1932 году один из пионеров советской радиотехники, Д. А. Рожанский.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

IV.14,а

А вот еще один представитель семейства электронных приборов, предназначенных для генерации колебаний сверхвысоких частот. Он называется магнетроном. Прибор с таким звучным именем изобретен еще в 20-е годы, но приобрел популярность значительно позже, после того как локация выдвинула задачу освоения сантиметровых волн. Тогда советскими инженерами Н. Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым под руководством М. А. Бонч-Бруевича и был создан первый многокамерный магнетрон.

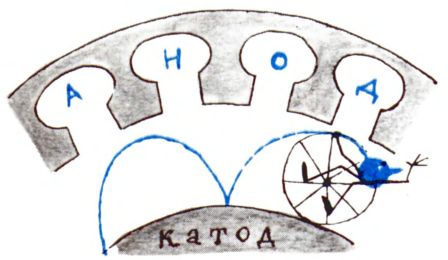


IV.15

Нам уже приходилось рассматривать поведение электрона, на который действуют одновременно электрические и магнитные силы (глава III, «Фигуры высшего пилотажа»). В магнитных линзах силы магнитного поля направлены вдоль траектории электронов. В

магнетроне они действуют поперек. Тем не менее электрон и в этом случае вынужден под действием магнитных сил осваивать технику высшего пилотажа. Здесь он летит по сложной кривой, носящей имя циклоиды. Такую же кривую описывает любая точка обода катящегося колеса.

В то же время анод стремится притянуть к себе все электроны, вырвать их из объятий магнитного поля. Налицо своеобразная конкуренция: электрическое поле анода заставляет электрон лететь прямо, а магнитное





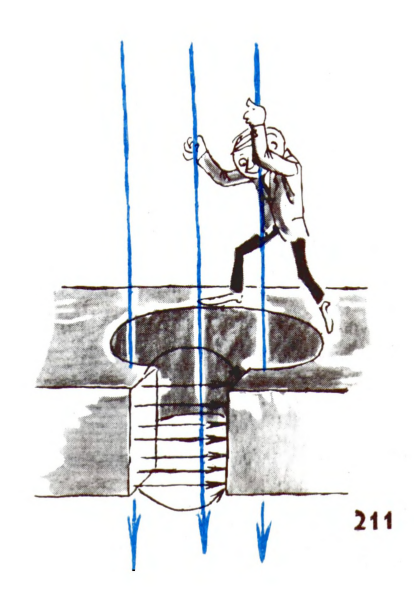
IV.16

Помимо постоянных полей, на электрон действует и переменное поле, возникающее в контурах магнетрона. Контуры здесь тоже объемные. Они помещаются прямо в аноде. Это и есть те самые камеры, из-за ко-

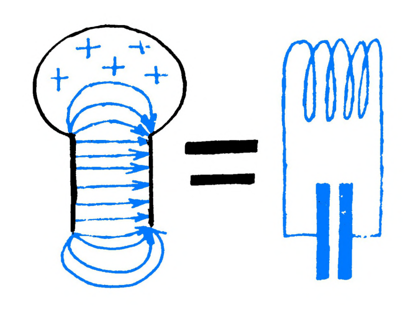


стремится как можно сильнее его закрутить.

Если магнитное поле усилить, закручивание увеличится. Если усиливать поле анода, то завитушки циклоиды начнут распрямляться. Силы таких противоположно действующих полей в магнетроне подбираются так, чтобы виток циклоиды не достигал анода, а электрон не попадал на анод.

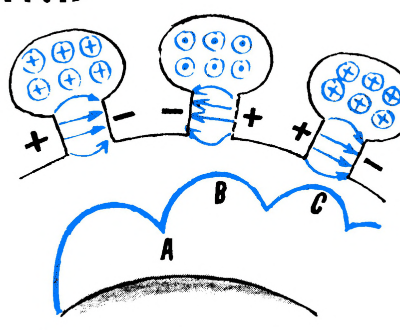


торых прибор назвали многокамерным магнетроном. Внутри камер сосредоточены магнитные силы, а электрические располагаются в щелях. Щели являются своеобразными конденсаторами контуров, а полости — их катушками.





IV.17

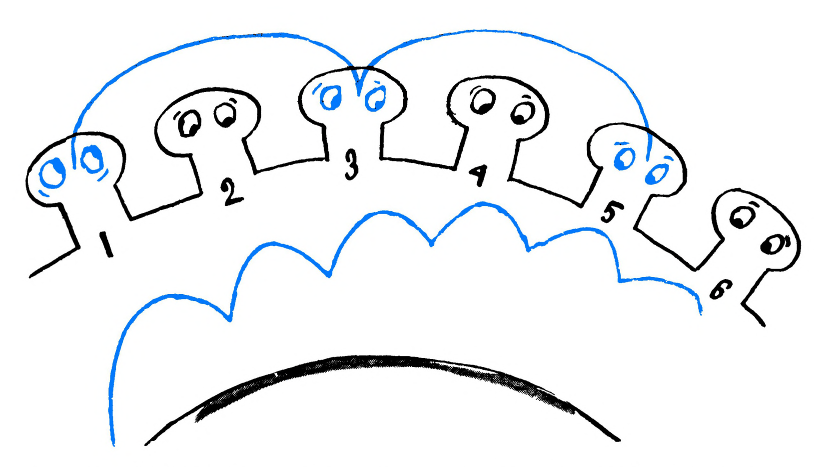


Так же как и в клистроне, поле контура может ускорить или замедлить электрон, пролетающий мимо, в зависимости от того, какая полуволна колебаний возникает в камере в этот момент. Попав в тормозящее поле одной из камер, электрон отдает ему часть энергии. Из-за этого силы его иссякают раньше, чем он успевает вернуться к катоду, и в точке *А* скорость его становится равной нулю. Но здесь он подхватывается полями соседней камеры-контура, приобретает новые силы, и в этой же точке *А* начинает новый виток. Второй виток приводит его к следующей камере (точка *B*).

IV.18

Камеры связаны между собой с помощью специальных связок, но не подряд, а через одну. Если пронумеровать их все по порядку, то все четные камеры будут связаны между собой, а нечетные — между собой. Поэтому в определенный момент времени во всех четных (или во всех нечетных) камерах действует одна и та же полуволна.

А в камерах, расположенных рядом, колебания противофазны: в тот момент, когда поле камеры 1 тормозит электроны, поле камеры 2 будет их ускорять. Но пока электрон удалялся от 1-й камеры и подле-

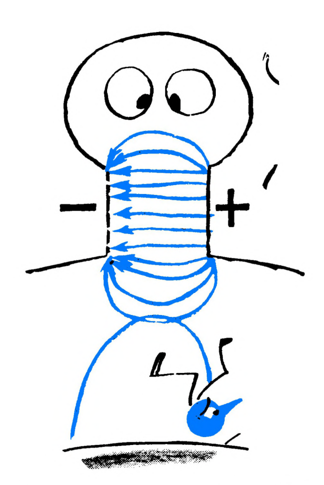


тал ко 2-й по второму витку, прошло как раз полпериода колебаний. Знаки в камерах переменились — теперь тормозящее поле возникло в камере 2.

Все тут рассчитано очень точно: облетая поочередно все камеры, электрон каждый раз поспевает как раз в те моменты, когда в камере действует тормозящая полуволна, заставляющая его отдавать часть энергии. В конце концов электрон отдаст всю энергию контурам и упадет на анод.

IV.19

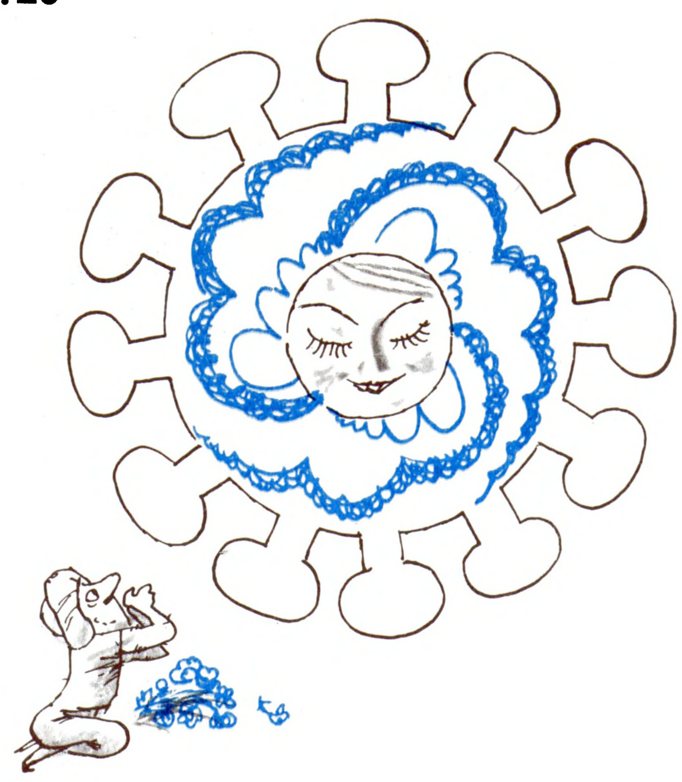
Иная участь постигнет его неудачливого собрата, если тот чуть-чуть запаздает и подлетит к камере 1 в момент действия ускоряющей полуволны. Получив от нее дополнительную энергию, он полетит, завершая виток циклоиды, и достигнет катода раньше, чем скорость его станет равной нулю. Ударившись о катод, он отдаст ему весь остаток своей энергии и выйдет из дальнейшей игры.



Вслед за ним на катод попадут все электроны, оказавшиеся не в фазе с переменным напряжением камер. А поскольку они отдают катоду остатки

энергии, то электронный дождь не охлаждает, а разогревает катод. Разогрев бывает настолько значительным, что часто нить накала магнетрона раскаляют только в начале процесса, а когда магнетрон начнет генерировать, накал отключают.

IV.20



Электроны, попавшие в фазу, взаимодействуют с полем камер по-разному, так как в момент тормозящей полуволны напряжения они находятся на различных участках циклоид.

Чем быстрее летит электрон, тем сильнее он тормозится. Более медленные догоняют более быстрых, сбиваются в «сгустки», и эти «сгустки» вращаются, словно спицы крутящегося колеса.

IV.21

Энергия, отданная электронами, находящимися в «сгустках», поддерживает колебания в контурах (камерах) магнетрона.

Частота колебаний электромагнитных волн равна собственной (резонансной) частоте контуров и может достигать 10 000 и даже 100 000 мегагерц. Петлей, введенной в одну из камер, отбирают энергию колебаний и направляют к антенне для излучения сантиметровых или миллиметровых волн.

IV.22

Если сравнить магнетрон с клистроном, его преимущества станут вполне очевидными: в клистроне каждый из электронов взаимодействует с контуром только однажды, а в магнетроне, вращаясь по кругу, он действует сразу на несколько камер. Бегать по кругу электрон вынужден под действием магнитного поля.

Благодаря повторяющемуся воздействию «сгустков» в камерах магнетрона возникают мощные колебания: мощность в импульсе составляет сотни и тысячи киловатт. Эти импульсы поступают в антенну локационной станции, которая их и направляет на цель (самолет, ракету).

Как ни сложны происходящие в магнетроне процессы, в основе их лежит тот же принцип, с которым мы сталкивались во всех электронных приборах: взаимодействие заряженных электронов с силами постоянных и переменных полей.



Наивность и творчество

Даже при первом коротком знакомстве с основными типами сверхвысокочастотных электронных приборов становится ясно, как многообразны и принципы и конструкции, порожденные диапазоном СВЧ. Но одна черта роднит все рассмотренные приборы; всюду использован резонанс. И в этом, если хотите, их общая слабость: все они хороши до тех пор, пока частота сигнала совпадает с собственной частотой контуров. А если нужно изменить частоту генерации?

В клистроне для этого изменяют напряжение на отражателе. Но таким способом можно перестроить частоту лишь в небольших пределах: до тех пор, пока сигнал способен раскачивать контуры. А это возможно только в том случае, если частота «толчков» близка к собственной частоте контура (см. III.8 и III.9).

Менять же настройку контура дело довольно сложное. С подобной проблемой встречаемся мы и в приемниках: чтобы усилить другие частоты, надо перестроить их контуры.

Долгое время с этим мирились. Казалось, придумать тут ничего не возможно: у всех приборов один и тот же дефект. На одной частоте они могут работать прекрасно, но нет никакой возможности изменять частоту в широких пределах или усилить такие сигналы, в которых содержится множество разных частот.

И тут нашелся изобретатель, который, столкнувшись с проблемой, задал ряд наивных вопросов.

Почему обязательно контур? Почему обязательно резонанс?

Наивность его была понятна. Откуда мог знать австрийский архитектор Рудольф Компфнер все трудности, которые пришлось преодолеть при разработке электронных приборов, предназначенных для сверхвысоких частот?

Но электронике посчастливилось. Именно архитектору, а вовсе не физику могли прийти в голову такие наивные вопросы. Быть может, именно этой наивности недоставало создателям электронных приборов, которые слишком привыкли в различных случаях жизни обращаться к помощи контуров.

Путь, избранный Компфнером, был весьма неожиданным: он решил отказаться от контура и добиться взаимодействия между пучками электронов и бегущей рядом электромагнитной волной.

Но как заставить бежать рядом друг с другом волну и поток электронов? Волна бежит со скоростью света, электроны — медленнее в 10—15 раз. Догнать свет частица не может — это давно доказал Эйнштейн. Но, как говорится, раз гора не может пойти к Магомету, может быть, к горе пойдет Магомет?

Электрон отстает от волны? Прекрасно.

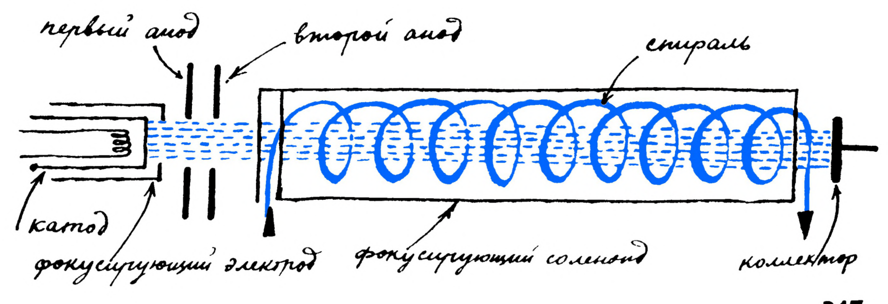
А почему не уменьшить скорость волны? Опять вопрос, который специалист мог расценить как наивный. Волна может двигаться только со скоростью света, а изменить скорость света никому не дано.

Но Компфнер был не только наивен. Задавшись наивным вопросом, он сумел творчески на него ответить. Если нельзя тормозить бегущие волны, может быть, можно сделать более длинным их путь? И он заставил волну бежать по спирали.

По виткам волна бежит со скоростью света. А как скоро она достигнет другого витка? Сообразить нетрудно: от витка к витку волна побежит во столько раз медленнее, во сколько раз расстояние между витками меньше длины самого витка.

А рядом бегут электроны. Сначала они волну чуть-чуть обгоняют, затем она начинает их тормозить. При этом волне передается энергия. И если в клистроне и магнетроне электрон отдает энергию резонатору в тот короткий момент, когда пролетает мимо, то здесь взаимодействие электронов с волною происходит на всем их пути. Потому и эффект усиления стал куда ощутимей: клистрон усиливал сигналы раз в десять, а прибор, созданный Компфнером, — в миллион раз. Да притом никаких резонаторов и никаких перестроек! Лампа может работать в широчайшем диапазоне частот.

Архитектору Компфнеру за этот прибор присвоили звание доктора физики, а сам прибор назвали *лампой с бегущей волной.*



Импульсы и Буратино

Возможность изменять частоту генерации в очень широких пределах — это огромное преимущество лампы с бегущей волной *. Но другая возможность, пожалуй, еще важнее: лампа с бегущей волной позволяет усилить сигналы, в которых содержится множество разных частот.

С одним видом такого сигнала мы с вами встречались — это сигнал, несущий изображение, то есть телевизионный сигнал, или видеосигнал. В нем есть частоты от самых низких и до довольно высоких — вплоть до 6 мегагерц (см. III. 41). Их можно усилить пентодом.

А вот для локации, у которой частоты несущих сигналов в десятки раз выше, а полоса усиления в десятки раз шире, чем в телевидении, очень ценным прибором оказалась лампа с бегущей волной.

Чтобы понять, почему полоса усиления должна быть настолько широкой, нужно знать, что представляет собой локационный сигнал.

Антенна локационной станции излучает в пространство импульсы, то есть короткие всплески сантиметровых волн. Излучение импульса должно прекратиться раньше, чем вернется предыдущий импульс, посланный к цели. Иначе очередной мощный импульс передатчика наложится на импульс, возвратившийся от цели, а поскольку при путешествии туда и обратно он растратил почти всю энергию, то на фоне импульса передатчика его невозможно будет заметить. С подобным явлением сталкивался каждый: эхо в лесу повторяет все ваши фразы, но вы слышите только последний слог.

«Путешествие» импульса длится недолго. Он летит со скоростью света и расстояние в несколько сотен метров проходит за миллионные доли секунды. За это время должен излучиться очередной импульс. Значит, длительность излучаемых импульсов должна быть не больше миллионных долей секунды. Для передатчиков это удобно: в узком импульсе можно сосредоточить большую энергию, мощность же источников постоянного тока, питающих генератор, будет при этом невелика. Зато много проблем возникает в связи с приемом и усилением возвратившихся сигналов, потому что чем уже сам импульс, тем шире полоса содержащихся в нем

---

* Обычно для генерации колебаний применяются лампы обратной волны, в которых волна и поток электронов движутся навстречу друг другу.

частот. Спросите у инженера, чем объясняется это странное свойство. В ответ он предложит вам «выуживать» из импульса поочередно все частоты, которые в нем содержатся, с помощью перестраиваемого по частоте «сита» (см. III.9). Или посоветует вам обратиться к математике, представив импульс как сумму простых синусоид посредством преобразований Фурье. Но то, что кажется убедительным специалисту, едва ли удовлетворит человека, впервые задавшего этот вопрос.

Поэтому мы подойдем к вопросу иначе — рассмотрим простой пример.

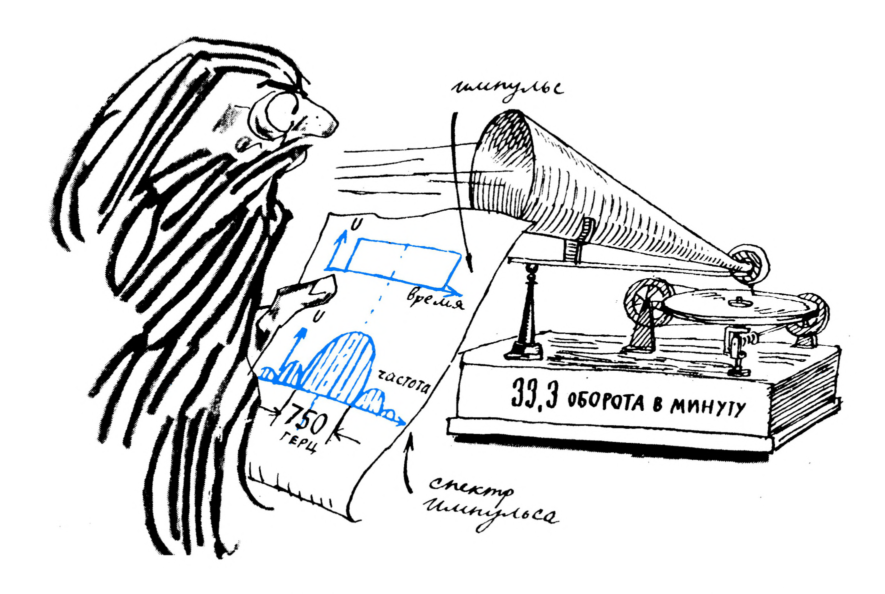
Очевидно, всем приходилось слышать детские радиопередачи с участием Буратино. Однако не каждый себе представляет, как удается актеру, исполняющему роль Буратино, имитировать голос деревянного человечка, совсем не похожий на привычные нам голоса.

Оказывается, актеру здесь помогает техника. Любой голос, записанный на пластинку, можно всегда сделать «голосом Буратино», увеличив число оборотов пластинки. Так поступают и в радиостудии. Актер, читающий роль Буратино, произносит ее очень медленно, нарочно растягивая слова. Роль записывается на пленку, а затем переписывается при числе оборотов, увеличенном приблизительно вдвое. Фразы, произнесенные медленно, приобретают нормальную скорость, а голос становится неестественно тонким. Почему? Потому что, увеличив число оборотов пленки в два раза, мы увеличили во столько же раз каждую из содержащихся в сигнале частот. В самом деле, если раньше мимо звукоснимателя проходило 800 звуковых гребней в секунду, то при удвоенном числе оборотов их станет 1600.

То же самое вы можете проделать с любой пластинкой, рассчитанной на 33,3 оборота в минуту, включив ее на повышенной скорости — 78 оборотов в минуту. При этом бас превратится в сопрано, и вы услышите смешные, «кукольные» голоса.

Ну хорошо, а при чем тут импульсы?

А разве пластинка — это не импульс? Длительность «импульса» — это время, необходимое, чтобы прослушать пластинку от начала и до конца. Долгоиграющая пластинка средних размеров проигрывается со скоростью 33,3 оборота в минуту приблизительно за 10 минут. В данном случае 10 минут — это длительность «импульса». Если мы заставим пластинку вращаться со скоростью 66,6 оборота в минуту, «импульс» станет вдвое короче. А все частоты, содержащиеся в звуке, записанном на этой пластинке, увеличат-

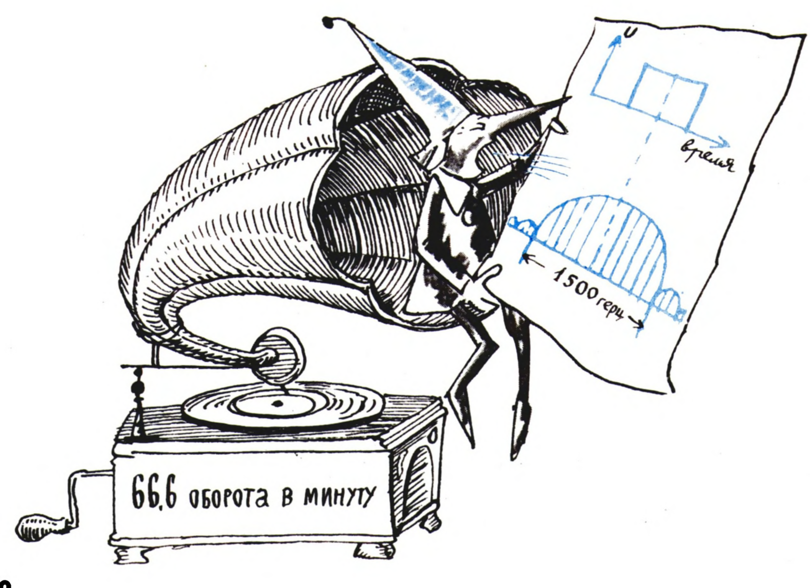


ся вдвое, и звук, занимавший раньше полосу от 50 до 800 герц, теперь займет полосу от 100 до 1600 герц.

Полоса при 33,3 *об/мин:* 800—50 = 750 герц.

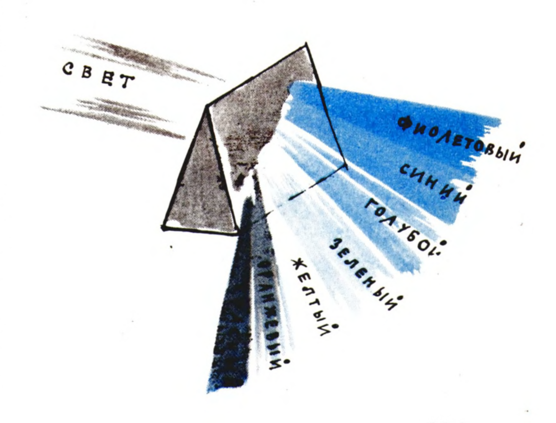
Полоса при 66,6 *об/мин*: 1600—100=1500 герц.

Полоса стала вдвое шире, оттого что импульс длится теперь не 10, а всего 5 минут.

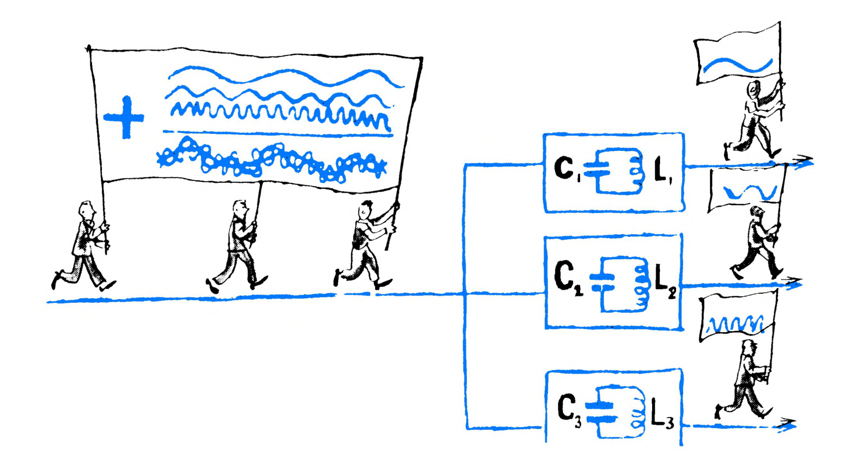


В локации импульс длится миллионные доли секунды, но закономерность останется той же: если импульс станет вдвое короче, значит ровно вдвое возрастет полоса частот.

Все знают, что с помощью светофильтров можно поочередно выделить из луча белого цвета красный, синий, зеленый. В электронике таким «светофильтром» может служить узкополосный контур LC (см. III. 9). Набор таких контуров подобен оптической призме: приходящий сигнал распадается здесь на множество разных «цветов».



В свое время Исаак Ньютон писал в книге об оптике, что ему удалось с помощью призмы получить «цветное изображение Солнца». Слово «изображение» Ньютон писал по-латыни — спектр. На-



бор всех частот, содержащихся в сложном сигнале, в электронике тоже теперь называют спектром, хотя «цветного изображения импульса» получить, конечно, нельзя. Правда, если бы наши глаза были способны видеть радиоволны так же, как волны оптического диапазона, каждый сигнал представлялся бы нам сложным узором с многочисленными оттенками, а порой и с целой гаммой цветов.

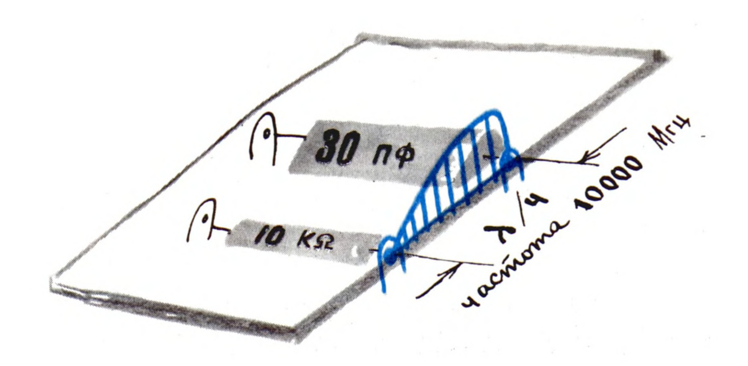
«Узор», приходящий к приемникам «верхо̀м на несущем сигнале», — это не просто узор на тюле, а скорее многоцветный орнамент ковров. Усиление сложных сигналов, обладающих очень широким спектром, — одна из важных и трудных проблем электроники. Во многих случаях решать эту проблему помогает лампа с бегущей волной.

Волны бегут по тоннелю

Как видите, сантиметровые волны электроника добывала нелегким трудом. Пришлось создавать усилительные и генераторные лампы сложной конструкции.

Кроме того, прием импульсов сантиметровых волн был связан с проблемой полосы усиления. И даже «доставка» сигналов от генератора до антенны и от антенны до входа приемника превратилась в такую проблему, решить которую было не так-то легко.

До перехода на диапазон СВЧ-колебаний сигнал пода-



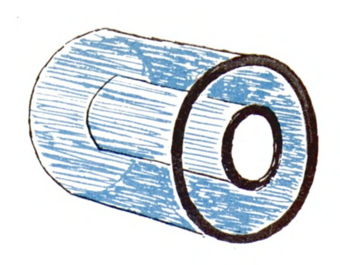
вался по проводу. Но все обычные представления становятся непригодными, лишь только дело доходит до сверхвысоких частот.

Сравните ток, создаваемый СВЧ-генераторами, и обычный промышленный ток. И тот и другой изменяется по синусоиде, но ток СВЧ совершает 10 000 000 000 колебаний в секунду, а ток, текущий по проводу вашей квартиры, всего 50. Во столько же раз отличаются волны: в СВЧ-генераторе — 3 сантиметра, в проводе — 6000 километров. На всей длине электропередачи, соединяющей Куйбышевскую ГЭС со столицей, умещается всего лишь четверть волны! Зато при СВЧ-колебаниях на проводе в несколько сантиметров умещается несколько волн Провод длиной в 7,5 миллиметра (четверть волны) уже работает как антенна, рассеивая





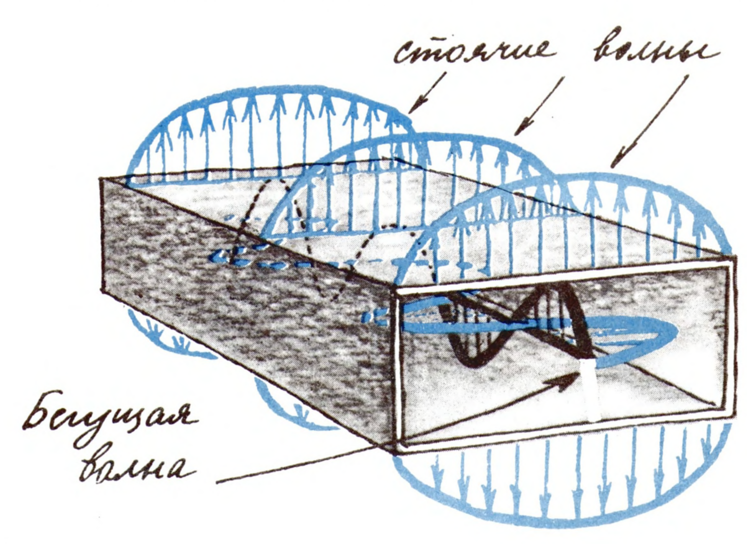




в пространство энергию СВЧ. А кроме того, с повышением частоты СВЧ-колебаний растут потери внутри проводов.

Еще со времен Фарадея известно, что стоит заряду прийти в движение, как вокруг него мгновенно появится ореол (см. III.46). В ореоле — магнитные силы. Чем интенсивней движение, тем сильнее поле магнитных сил. Совершая 10 000 000 000 колебаний в секунду, электрон создает такое сильное поле, что находящимся рядом соседям оно начинает заметно мешать. Ведь и они совершают такие же колебания, и каждый из них имеет свой ореол. Внутри провода электронам становится тесно, они от оси его уходят в поверхностный слой, где им гораздо свободней: по крайней мере снаружи провода их никто не теснит.

Отсюда следует важное свойство: сверхвысокочастотные токи всегда текут по тонкому наружному слою, по самой поверхности проводов. Конечно, при этом сопротивление им становится больше: ведь одно дело, если вода течет по ши-



роким трубам, а другое — если пустить ее по узкому зазору между двух труб. За счет большого сопротивления энергия СВЧ-колебаний начинает расходоваться на нагрев проводов. Короче, провод для передачи СВЧ-колебаний не пригоден. Поэтому энергию, колеблющуюся со сверхвысокой частотой, транспортируют без проводов.

Как?

Прямо через пространство.

Однако пространство должно быть ограничено, иначе волны побегут во все стороны, энергия растечется и в нужное место придет лишь ничтожная часть. Чтобы этого не случилось, волну транспортируют по специальным каналам, подобным тоннелю метро. Тоннель называется волноводом.

Поле внутри волновода имеет сложный характер. Поперек волновода возникают стоячие волны, а вдоль оси энергия переносится на бегущей волне. Щель, размеры которой соизмеримы с волнами, может служить антенной. Иногда к щели примыкает рупор, собирающий волны в узкий направленный луч.

Теория, созданная Максвеллом, позволяет предвидеть, как поведут себя волны, и рассчитать размеры стенок самого волновода и размеры антенны для создания тонких лучей.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

IV.23

Сколько времени жарится утка? Около часа. А можно поджарить ее за 6 минут. Для этого созданы чудо-печи. В них нет ни дров, ни газа, ни раскаленных спиралей. На чем же жарится утка?

На магнетронах!

IV.24

Если между обкладками конденсатора поместить материал с бесконечно большим сопротивлением



(идеальный изолятор), ток по нему не потечет.

Но в природе нет ничего идеального. Все изоляторы (к числу которых относится и тело утки) обладают конечным сопротивлением, и под действием электрического поля по ним течет ток.

Все изоляторы обладают плохой теплопроводностью, поэтому обычный огонь прогревает их долго и неравномерно: утка может сгореть снаружи и остаться сырой внутри. Поле же насквозь пронизывает помещенный в него изолятор (утку), возникающий ток порождает тепло. Тепла выделится тем больше, чем выше частота колебаний энергии. Источником таких колебаний может служить магнетрон.



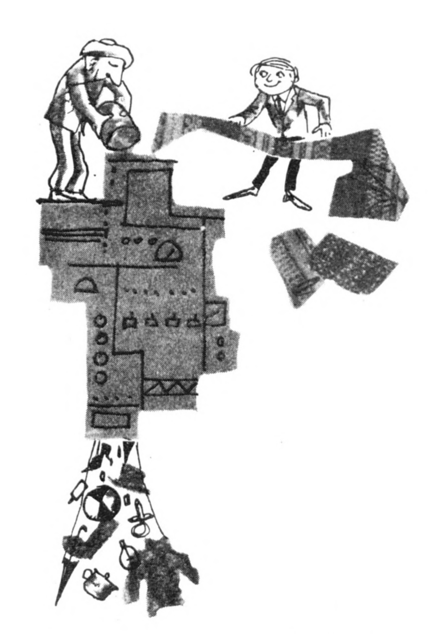
IV.25

Высокочастотное «холодное пламя» нашло себе множество применений. С его помощью размягчают стекло, чтобы придать ему нужную форму, прессуют пластмассу, вулканизируют резину, сушат хлопок и шерсть.

Широко использует это «пламя» пищевая промышленность. На нем коптят ветчину, сушат табак и сахар, уничтожают личинки мучных червей.

Остроумно устройство электронной «швейной машины». Между обкладками конденсатора протягиваются две кромки пластмассы или резины. Под действием поля

кромки спекаются и образуется шов. Шов без всяких отверстий — что может быть лучше для изготовления надувных матрацев, лодок, водоплавающих игрушек, непромокаемых чехлов и плащей!



IV.26

Если изоляционные материалы нагреваются под действием электрического поля, то вихревые токи в металлах возникают под действием магнитных полей. Для получения этих полей мощные генераторы создают переменные токи, которые и циркулируют по обмоткам огромных катушек, обвивающих индукционную печь. В таких печах могут расплавляться тонны металла, так как мощность их достигает тысяч и тысяч киловатт.



Способность магнитного поля проникать внутрь металла позволила осуществлять плавку настолько быстро, что металл не успевает окислиться, а это весьма улучшает качество плавки.

IV.27

Очень часто бывает необходимо повысить прочность стальных деталей всевозможных машин и приборов. Для этого их можно подвергнуть закалке с помощью ультравысоких частот (УВЧ). При таких частотах ток циркулирует только в

наружном слое металла. Поверхность его раскаляется, а внутри он остается холодным и сохраняет пластичность. Действуя поочередно то водой, то «высокочастотным пламенем», получают детали лучшего качества — высокую прочность снаружи и упругость внутри.

IV. 28

А вот примеры «самообслуживания»: использование средств, созданных электроникой, для своих же собственных нужд. Пайка стекла с металлом на стыке баллонов с цоколем лампы осуществляется с помощью высокочастотных полей.

Для создания высокого вакуума в лампе необходимо удалить из деталей газ. Для этого лампу помещают между витками катушки. Поле докрасна раскаляет детали внутри баллона, газ из них улетучивается, а затем откачивается из баллона.

Чистый кремний или германий для производства полупроводниковых приборов получают опять-таки путем расплавления кристаллов в вакууме с помощью высокочастотных полей.



Эпизоды прошлой войны

До сих пор речь шла только о мирных «профессиях» электрона. Вместе с тем хорошо известно, что импульсы сантиметровых волн, собранные в узкий направленный луч радиолокационной антенной, были весьма эффективным оружием в прошлой войне. Не случайно именно в военных радиолокационных устройствах получали «путевку в жизнь» и первое «боевое крещение» и магнетрон, и клистрон, и лампа с бегу-

щей волной. Но радиолокационные станции — это лишь одна сторона дела. А вторая...

В одну из темных февральских ночей 1942 года два немецких линкора, «Шарнгорст» и «Гнейзенау», и крейсер «Принц Ойген» вышли из Бреста, блокированного с моря кораблями английского флота, и прошли через Ла-Манш. Ни одна из сотен английских станций не сумела их обнаружить — экраны локаторов «ослепли» от немецких станций помех.

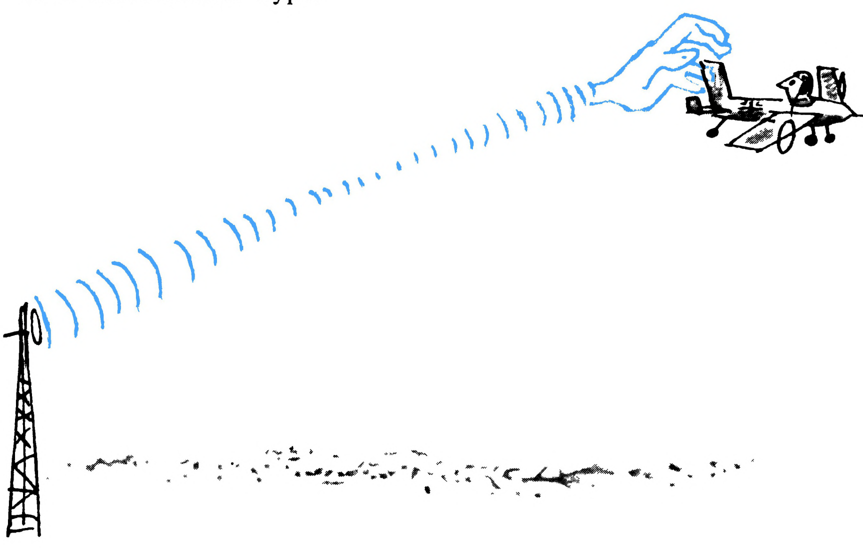
Так началась великая битва средств электроники, не прекращавшаяся в течение всей мировой войны.

Два десятилетия минуло со дня окончания этой войны, но картины ее грандиозных сражений до сих пор живы в памяти современников. Даже те, кто не принимал в них участия, представляют себе размах и жестокость этих сражений по фильмам, по литературе, по рассказам ветеранов войны.

Зато даже у непосредственного участника осталось порой не очень четкое представление о другом виде сражений — невидимого, но непрерывного состязания электронов и волн.

А ведь исход большинства операций в значительной степени зависел от умелого применения средств электронной техники. Вот несколько эпизодов.

Для наведения своих бомбардировщиков на города Великобритании немцы установили на завоеванной территории Бельгии, Голландии, Франции специальные радиомаяки. Узкий луч маяка помогал немецкому летчику точно выдерживать намеченный курс.



Попытки подавить эти сигналы не приносили успеха: как только работа маяка нарушалась, на смену ему подключался маяк на другой частоте. Тогда англичане избрали иной метод противодействия: они построили на своей территории станции, способные принимать и вновь излучать (ретранслировать) сигнал немецких радиомаяков. «Окраска» сигнала не изменялась, но направление, указанное немецкому летчику узким лучом ретрансляционной станции, уводило его от цели, направляя на ложный путь. Был даже случай, когда ложный сигнал заставил немецкого летчика приземлиться на территории Англии: садясь на аэродроме в Девоншире, он до последних мгновений был твердо уверен, что прилетел во Францию, на собственный аэродром.

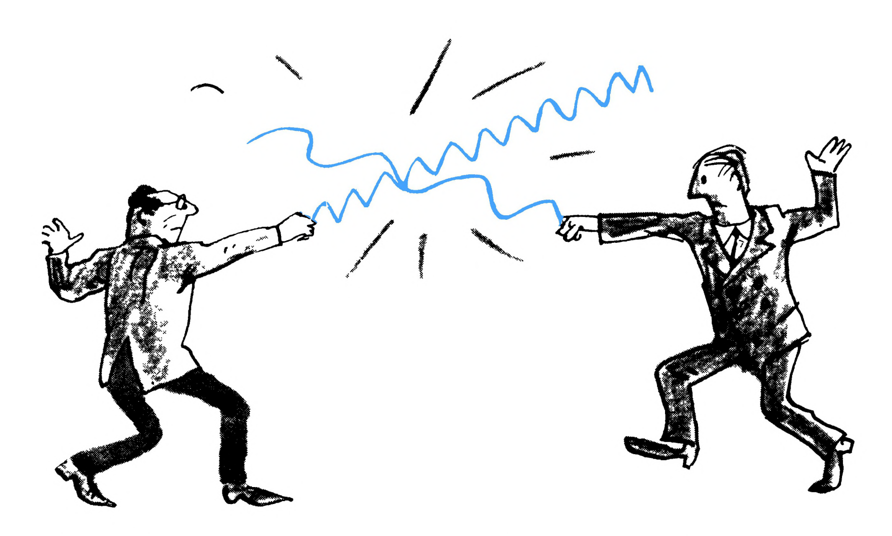
Иногда ложный сигнал заставлял немцев сбрасывать бомбы не на цель, а на пустынную местность или в Ла-Манш. В конце концов немецкие летчики перестали верить и чужим и своим маякам.

Тогда немецкое командование пошло на военную хитрость. Немецкие радиостанции стали транслировать в Англию пропагандистский текст. Жители Лондона вскоре заметили одно странное обстоятельство: всякий раз перед прилетом «гостей» из Германии голос немецкого диктора начинает звучать сильнее. В то же время в окрестностях Лондона голос становился едва различимым. Обстоятельство это заинтересовало разведку, но долгое время она не могла найти ему объяснения. Оказалось, пропаганда была тут лишь маскировкой, а назначение станции совсем иное. Она наводила самолеты немцев на Лондон. Для этого незадолго до вылета изменялся режим излучения: вместо обычной антенны включалась антенна направленная, и волны шли узким лучом. Этот луч направлялся на Лондон, поэтому в Лондоне сигнал усиливался, а в окрестностях исчезал.

Когда хитрость была разгадана, бороться с ней стало легко. Вновь использовали ретрансляцию, и опять немецкие бомбы полетели в Ла-Манш.

Электроны ведут сражение

Давно отгремели залпы орудий и взрывы авиабомб. Люди борются за сохранение мира. Мировая война закончилась. А электронная — нет. Она ведется без передышки, без перемирий, без объявления, многие годы подряд. Специалисты



по электронике не нуждаются в полях сражений, они ведут «битву» в лабораториях и цехах. Идет борьба за точность аппаратуры, за надежность и быстродействие, и каждое новое достижение — это очередная победа в непрерывной «электронной войне».

Средства, которые использует в этой войне электроника, распределены по родам ее «войск». Есть средства защиты и нападения, есть средства разведки и маскирующие лучи. Радиолуч может быть очень опасным. Правда, он не несет в себе смерть, зато предвещает смерть. Если позволить ему беспрепятственно «щупать» пространство, он направит снаряд или бомбу точно на цель. Отсюда вывод: с лучами надо бороться.

Как?

Нашлось множество средств.

Разработаны материалы, поглощающие радиоволны. Если цель покрыта таким материалом, волна от нее отражаться не будет, импульс не возвратится к локатору или вернется настолько ослабленным, что цель на экране не будет замечена.

А можно решить вопрос по-другому. Пусть себе отражаются импульсы, но их все равно нельзя зафиксировать, если одновременно с отраженным сигналом послать к приемнику станции более мощный сигнал помех. Частоты помех должны совпадать с частотой настройки приемника противника. А ведь он настроен на частоту излучаемых импульсов. Чтобы определить его настройку, надо исследовать излученный сигнал. Для того и ведется разведка: специальные разведыва-

тельные приемники ловят, записывают, анализируют излученный сигнал.

Радиомаскировка затрудняет разведку: среди многих маскирующих сигналов, излученных на разных частотах, не всегда обнаружишь опасный. Если сигнал расшифрован, противник будет использовать специальные станции, излучающие помехи в диапазоне рабочих частот. Однако и при помехах станция может работать нормально, если предусмотреть специальные средства, позволяющие отличить собственные сигналы от посторонних помех. Модулируя сигнал специальными кодами, можно создать такие системы, которые при наличии помех противника способны будут обнаруживать цели, определять их координаты, осуществлять наводку орудий, управлять ракетой, обеспечивать связь.

Так в сложном взаимодействии электронных устройств и приборов рождается тактика электронной войны.

В числе многих специальностей электрона специальность военная в наше тревожное время играет, к сожалению, далеко не последнюю роль. И нам, людям, стремящимся к миру, надо помнить об этом и хорошо представлять себе, какую роль в деле защиты нашей страны от агрессии должен играть электрон.

Палка о двух концах

Без электронных приборов современную армию представить себе невозможно. Электроника стала неотъемлемой частью ее организма, если хотите — ее нервной системой. С помощью электроники осуществляется связь между подразделениями и со штабом. С ее помощью обнаруживаются цели противника, она обеспечивает точность стрельбы. А еще — беспилотные самолеты, танки, ведущие бой без танкистов, ракеты, меняющие траекторию по команде с земли.

Без электроники воевать уже невозможно. Но разработчикам современной военной техники всегда приходится помнить, что электроника — палка о двух концах.

Большинство применяемых в военном деле приборов излучает в пространство волны. А где гарантия, что этими излучениями не воспользуется враг?

Команду, переданную по радио, противник может подслушать. Код, применяемый для сохранения тайны, противник

может расшифровать. По излучениям систем управления и локационных станций можно судить о том, где расположены части и что они намерены предпринимать. Зная характер сигналов, можно создать помехи в рабочем диапазоне частот.

Вот почему целая отрасль электроники занимается разработкой предназначенных для разведки приборов, которые могут не только обнаружить сигналы, но и записать их на пленку, произвести их анализ, определить их назначение и «окраску», то есть исследовать их спектральный состав.

Известно, что ракеты, управляемые по радио, начали применяться фашистской Германией еще в прошлой войне. Они посылали на свою базу сигналы для контроля скорости и высоты. Приборы-разведчики англичан не только улавливали эти сигналы, но и расшифровывали команды, которыми управлялись ракеты. Английские специалисты создали аппаратуру для излучения ложных команд, по которым ракеты, не достигнув намеченной цели, начинали спускаться вниз. Радиопротиводействие оказалось столь эффективным, что немцам пришлось отказаться от радиоуправления и положиться на гироскоп.

От степени осведомленности относительно радиосредств армии противника в значительной мере зависит исход войны.



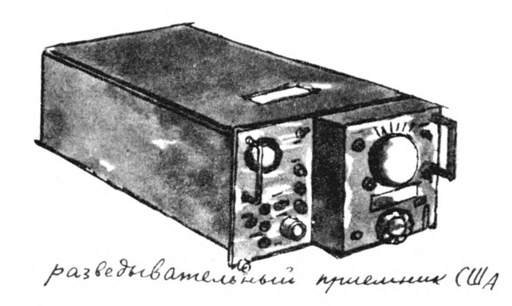


Командование вооруженных сил современной Америки стремится, не считаясь со средствами, выведать характеристики электронных систем и приборов, которыми вооружены армии социалистических стран. Две тысячи станций радиоперехвата, установленных на кораблях, самолетах и базах, и восемь тысяч операторов, ведущих разведку, содержит в настоящее время национальный совет безопасности США.

Многие, очевидно, помнят, как в свое время американцы пытались вести разведку радиосредствами, установленными на воздушных шарах. Теперь вместо шаров запускаются спутники.

В последние годы целый ряд американских фирм, в том числе и такой гигант, как «Дженерал электрик», специализируются в области миниатюрных приборов, позволяющих осуществлять шпионаж. Чего только нет у них в прейскуранте!

Миниатюрные телекамеры и магнитофоны, которые можно упрятать в мебель, в картины и в стены. Приемники для подслушивания, вмонтированные в тюбик губной помады, в авторучку, в чехол от часов. Созданы микрофоны, имеющие форму тонкой пластинки, которую очень удобно подсунуть под дверь.



разведывательный приемник США

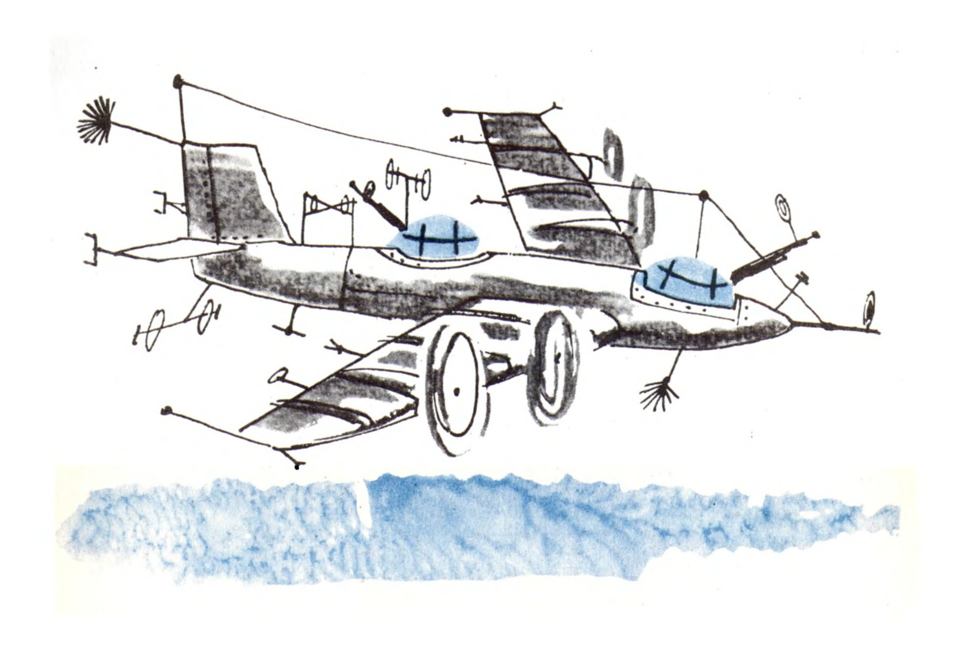
Эти изделия пользуются очень широким спросом: ими снабжаются государственные агенты, засылаемые в глубь чужих территорий, а также агенты служб безопасности и частные лица, осуществляющие слежку и шпионаж среди граждан своей страны. Сознавая, что «второй конец палки» может в любой момент ударить тех, кто прибегает к помощи этих приборов, фирма «Клифтон» в конце прейскуранта разработанных ею новинок поместила красноречивый текст: «Будьте осторожны! Во многих странах мира действуют законы, запрещающие использование некоторых из перечисленных выше аппаратов. Дело покупателя (а никак не продавца) выяснить у юриста, каким образом эти законы могут применяться в отношении использования каждого из приобретенных изделий».

«Будьте осторожны!..» Весьма уместное напоминание. К сожалению, к нему не прислушались те, кто оснащал новейшими средствами техники самолет «Локхид У-2», на котором 1 мая 1960 года Френсис Г. Пауэрс, нарушив государственную границу СССР, совершил свой противозаконный полет. На борту его самолета стояли специальные передатчики, излучающие помехи, многоканальный разведывательный приемник на все «ходовые» диапазоны радиоволн (от 2,5 сантиметра до 1 метра). Спаренные антенны позволяли точно устанавливать место, откуда принят сигнал. Все сигналы записывались на магнитные ленты в надежде, что впоследствии по расшифрованным записям можно будет понять назначение всех сигналов и определить диапазоны рабочих частот.

К счастью, надежды американской разведки не оправдались: ведь полет над чужой территорией с целью разведки — тоже палка о двух концах...

Сигналы против сигналов

Вход приемника локационной станции — это своего рода горло. Антенна приемника подобна открытому рту. Если частота помехи находится в полосе настройки антенны, приемник «проглотит» с одинаковым аппетитом и свой и чужой



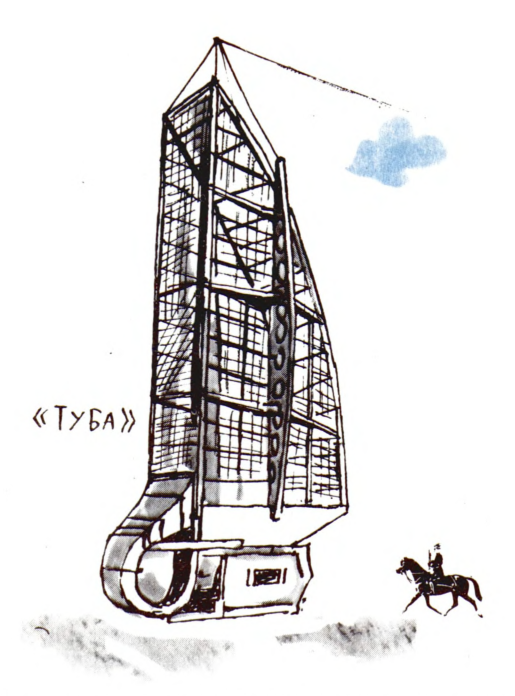
сигналы. И станция «захлебнется», если помеха будет намного мощнее, чем собственный отраженный импульс.

Подавление локационных станций противника мощной помехой часто использовалось в прошлой войне.

Для защиты города Бремена от налетов бомбардировщиков немцы использовали зенитные батареи, управляемые станциями орудийной наводки (СОН) типа «Вюрцбург».

Разведка союзников установила, что несущая частота этих станций равна 560 мегагерцам. Летом 1943 года бомбардировщики 8-й американской воздушной армии были оснащены передатчиками типа «Карпет». Передатчики излучали помеху — спектр частот при средней частоте 560 мегагерц. В октябре 1943 года подвели первый итог: самолетов с «Карпетом» было сбито в два раза меньше, чем без него.

Помехи — метод весьма эффективный. Если радио играет роль нервной системы армии, то помехи являются средством, способным эту систему почти полностью парализовать. Уяснив эту истину, союзные армии применяли разнообразные средства противодействия в минувшей войне. На базе «летающей крепости» типа В-29 американцы создали целый «комбайн» всевозможных помех. На борту «летающей крепости» стояло 18 передатчиков, разведывательные приемники, а антенн пришлось поставить так много, что самолет весь «ощетинился» и получил прозвище «дикобраз».



Однако нет в электронике метода, против которого нельзя было бы найти новых защитных средств.

Два конца палки — случай довольно-таки тривиальный. Можно вспомнить историю со множеством разных концов. Первым концом одной из подобных историй была установка на немецких истребителях радиолокационных станций, осуществлявших прицеливание и перехват. Вторым концом палки англичане воспользовались сразу: вскоре они уловили эти сигналы и определили диапазон их частот. Тут же был создан и третий конец: английские бомбардировщики были снабжены станциями помех.

Вы думаете, этим «концы» исчерпались? Ничуть не бывало! Немецкие летчики научились вести истребители на сигналы помех, словно на радиомаяки!

Снова чаша весов потянула в сторону истребителей, и снова было найдено средство борьбы.

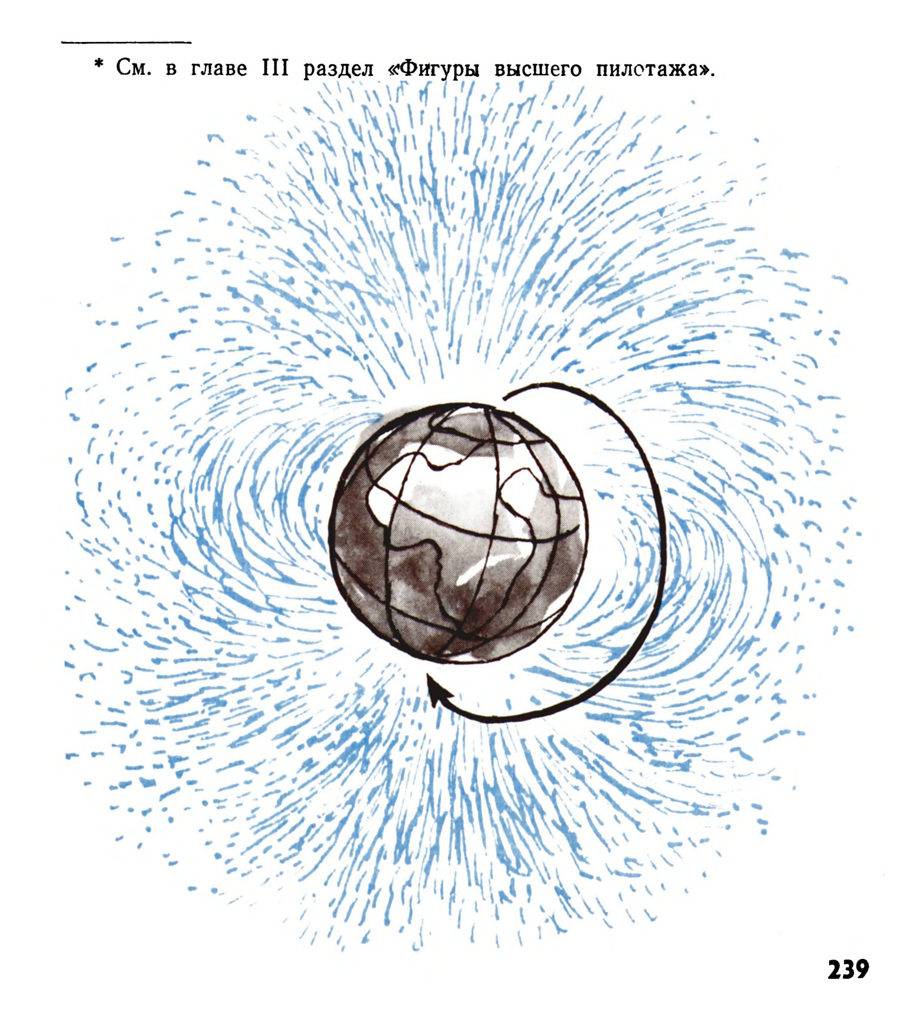
Раз помехи, излучаемые с борта бомбардировщика, помогают противнику, значит надо излучать эти помехи с земли. Вдоль южного побережья Англии расположились громадные американские передатчики «Туба». От их мощных сигналов истребители немцев «слепли» еще в Европе, а английские бомбардировщики, избавившись от преследователей, спокойно летели к дому через Ла-Манш.

В современных условиях помехи стали столь эффективными, что найти третий конец палки теперь бывает не так-то легко.

В августе 1958 года взрыв, произведенный американцами на острове Джонстон, нарушил связь между Токио и Калифорнией в диапазоне от 5 до 25 мегагерц. Связь была восстановлена лишь спустя 18 часов.

Атомный взрыв рождает огромное количество электронов в виде быстрых бета-частиц. В магнитном поле Земли электроны ведут себя так же, как в поле магнитной линзы, — они «входят в штопор» и движутся вдоль линий магнитных сил *.

* См. в главе III раздел «Фигуры высшего пилотажа».



Зная структуру магнитного поля Земли, можно направить в любую область огромную массу возникших при взрыве бета-частиц.

В руках сыновей Земли сосредоточена теперь такая энергия, что по сравнению с ней Земля стала казаться маленькой кроткой старушкой под прозрачной вуалью магнитного поля и бесчисленных радиоволн. Старушка очень обеспокоена: что, если, увлекаясь своими опасными играми, дети зайдут чересчур далеко?

Цель для отвода глаз

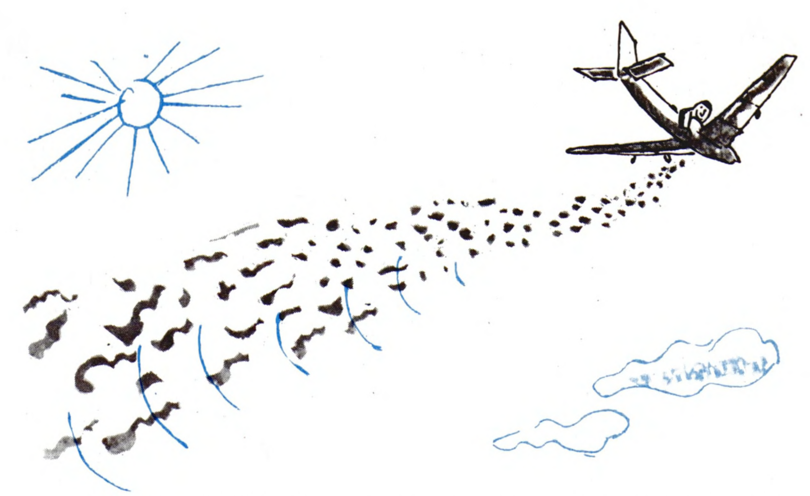
Большого эффекта иногда удается достичь очень несложными средствами. Простым способом противодействия является применение отражателей, например обыкновенной фольги.

Самолет сбросит куски металлизированной ленты, и на экране локаторов появится ложная цель. «Глаза артиллерии» начнут следить за ложными целями, а вслед за «глазами» стволы орудий автоматически повернутся в ту сторону, куда направлены зеркала локационных антенн.

Значит, ложная цель может служить не только «для отвода глаз» — вместе с «глазами» она «отведет» и снаряд.

Лента фольги весит немного. Каждый из самолетов может





иметь на борту такое ее количество, которое позволяет создать на экранах локаторов ложный массированный налет.

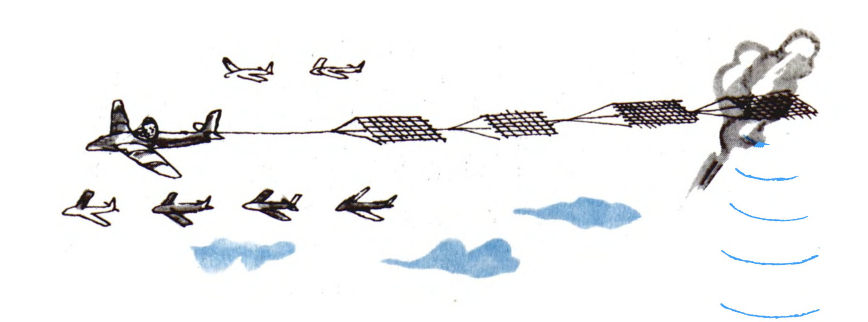
До 700 ложных целей удавалось создать одному самолету в годы минувшей войны! Пойди разберись, по какой из 700 целей надо вести огонь. Простота этого способа способствовала его популярности: за годы войны на территорию фашистской Германии было сброшено около 20 тысяч тонн фольги!

Для эффективного отражения применяются уголковые отражатели всевозможных размеров и форм. В годы войны с помощью таких отражателей «для отвода глаз» бортовых станций бомбометания создавались целые «лжегорода».

Применялись специальные сети, состоящие из таких отражателей. Сеть отражала большую часть энергии, и станции орудийной наводки автоматически направляли орудия на эту ложную цель. Один самолет «ловил в сети» снаряды противника, очищая путь всем остальным.

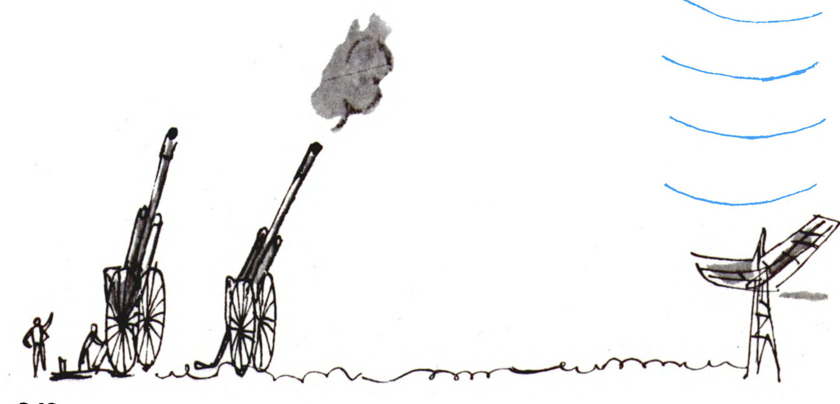
В больших масштабах использовались средства электронной войны летом 1944 года, когда высадкой войск в Нормандии был открыт второй фронт.

Готовясь к встрече десанта, немцы сосредоточили на северном побережье Европы огромное количество станций обнаружения, контролировавших все окружающее пространство и каждый клочок земли. Артиллерийским огнем и ударами с воздуха союзники уничтожили перед началом десанта около 80 процентов немецких станций, а для подавления оставшихся средств противника было установлено около 700 станций помех.



Началась грандиозная мистификация: над Ла-Маншем непрерывно курсировали самолеты союзников, создававшие с помощью отражателей и специальных сигналов ложные цели то здесь, то там. Сбитые с толку немецкие летчики были вконец измотаны множеством ложных тревог.

Огромным количеством ложных сигналов и целей в течение четырех с лишним часов союзники имитировали движение десанта в направлении Булони и в конце концов заставили немцев сосредоточить все силы в районах Булони и Кале. А в это время войска союзников высаживались в Нормандии, где оборона немцев была настолько ослаблена, что из 2127 кораблей, участвовавших в десанте, немцам удалось потопить только 6.



Ракеты и электроника

За 20 лет, прошедших после разгрома фашистской Германии, в развитии техники произошел огромный скачок. Если раньше военная электроника применялась на земле, на кораблях и на самолетах, то теперь ей приходится создавать приборы и для многих типов ракет.

Приборы эти должны быть легкими и компактными, потому что объем ракет ограничен, а лишний вес аппаратуры снизит дальность ракеты в несколько раз. И вместе с тем приборы должны быть особенно прочными: при перегрузках во время старта не должен выйти из строя ни один элемент. Вопросы точности измерений и быстроты обработки данных стоят здесь особенно остро в связи с огромными скоростями ракет. Порой бывает не так-то легко совместить в приборе все эти качества. Но ведь за 20 лет и сама электроника предоставила конструктору этих приборов много новых замечательных средств.

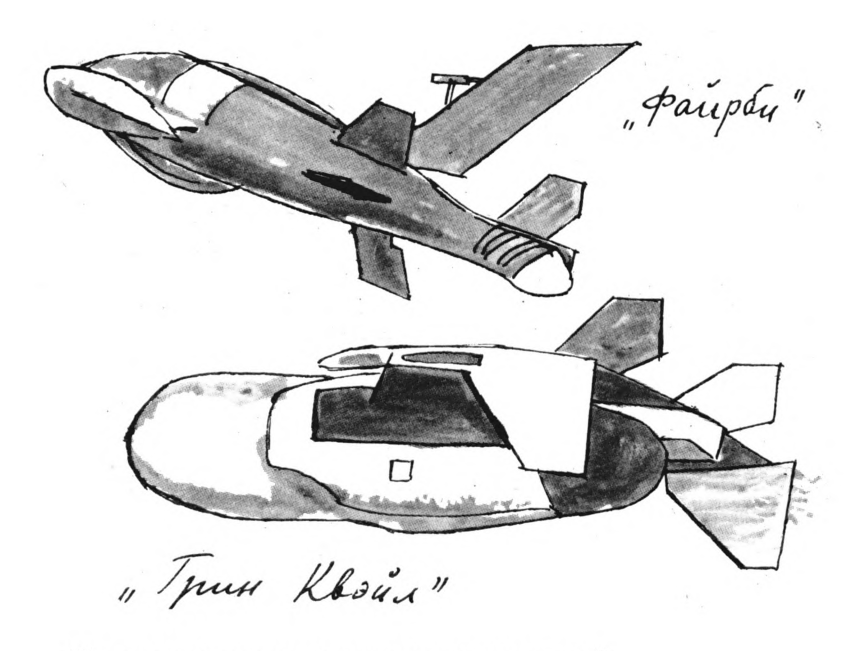
Если в прошлой войне в основном использовалась аппаратура на лампах, то теперь почти вся военная техника перешла на полупроводники. Да и в схемных вопросах прогресс совершился немалый, особенно в области логических, управляющих, вычислительных схем.

Все новейшие достижения используются при создании новых типов ракет. Но и опыт прошедших лет не пропадает даром. Старая тактика обретает новые формы. Например, для помехи наземным станциям и для создания ложных целей теперь прибегают к помощи тех же ракет. Вот две подобные ракеты, принятые в настоящее время на вооружение армии США. Это ракеты типа «Грин Квэйл» («Зеленый перепел») и «Файрби» («Огненная пчела»).

Запускаются они с самолета, а управляются либо с помощью радио, либо посредством собственных программных устройств. Обогнав самолет, с которого их запустили, они глушат станции, излучая помехи, и в случае надобности могут служить ложной целью, принимая огонь на себя. Завершив операцию, такие ракеты «кончают жизнь самоубийством» — взрываются, чтобы сохранить в секрете все, что есть у них на борту.

Ложные радиолокационные цели используются современной техникой и для обеспечения действия межконтинентальных баллистических ракет.

В частности, в США исследуются способы окружения боевой головки ракеты облаком металлических осколков, образующих ложную цель.



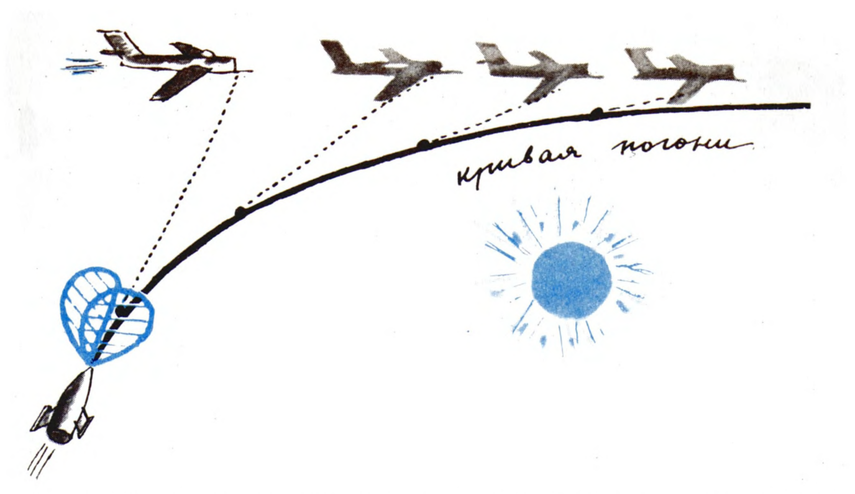
Но как доставить в космос эти осколки?

Не загружать же ими ракету! Ведь каждый грамм, доставленный на траекторию, оплачивается слишком высокой ценой.

Выход нашелся очень простой.

Ракета-носитель, доставив головку на траекторию, сыграла свою основную роль. Теперь можно ее использовать в качестве ложной цели. После того как боевая головка вышла на траекторию и отделилась от ракеты-носителя, последняя взрывается, превращаясь в облако осколков. На большой высоте атмосфера сильно разрежена, и потому осколки сопровождают ракету, двигаясь с той же скоростью. Размеры облака достигают сотен квадратных километров. Маленькая боевая головка в этом гигантском облаке совсем скрывается, и обнаружить ее с помощью радиолокационных станций нелегко.

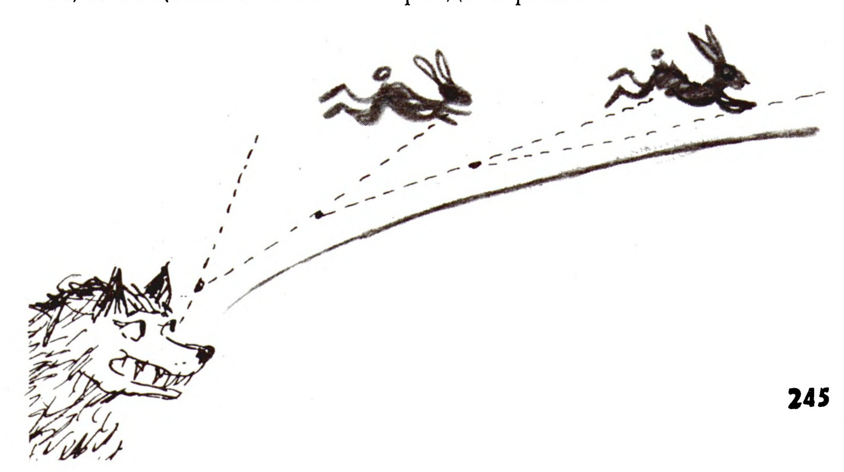
Еще во время второй мировой войны стали применяться самонаводящиеся ракеты или торпеды. На головке снаряда ставились две антенны, излучавшие сигнал под углом. Пока снаряд летит прямо к цели, сигналы антенн одинаковы. Стоит ему чуть-чуть отклониться — появляется разность сигналов, по которой автоматическое устройство снова направляет снаряд на цель. В результате он летит по траектории, которую математики называют «кривой погони». Охотники знают, что точно так же волк догоняет зайца: пока косой

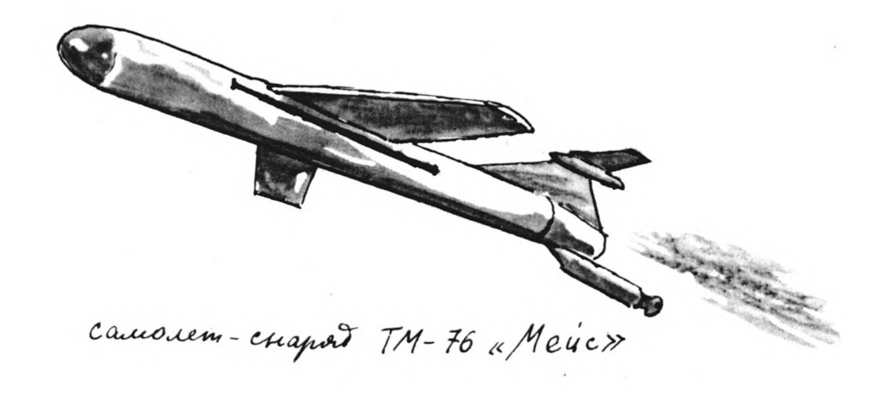


не замечает опасности, он движется прямо, но, завидев погоню, начинает петлять. Волк же, так же как снаряд с электронной головкой, все время смотрит на цель.

Основоположник кибернетики Норберт Винер рассказывал о таком эпизоде. Однажды он находился в лаборатории военного ведомства. Кроме него, никого в помещении не было, но ему все время казалось, что кто-то за ним неустанно следит. И тут он обнаружил, что тупая морда торпеды, подвешенной на кронштейнах, поворачивалась в ту сторону, куда перемещается он сам. Ощущение было не из приятных. Показалось, будто рядом с ним в пустой комнате притаился безжалостный хищник, в голове которого вместо мозга — смертоносный заряд.

Впрочем, заряд без мозга — это еще не самое худшее. Когда кибернетика стала снабжать снаряды, ракеты, торпеды «искусственным мозгом», хищники стали намного опаснее, а общение с ними — гораздо страшней.




Самолет-снаряд ТМ-76 «Мейс»

Вот новинки подобного рода.

На самолете-снаряде «Матадор» (США) установлена система наведения типа «Атран», защищенная от помех. Принцип действия ее любопытен. В «памяти» ее заранее заложена карта. Другая карта той местности, над которой снаряд пролетает, снимается с помощью панорамных локационных устройств. Электронная схема сравнивает эти две карты, сопоставляет важнейшие ориентиры и, вырабатывая поправки, передает их автопилоту. Самолет-снаряд, снабженный таким прибором не могли сбить с курса при испытаниях 6 станций помех. Он ведет себя, как человек с идеальной памятью: если местность ему знакома, то отдельные ложные ориентиры его с пути не собьют.

Современная локационная техника приобрела много новых возможностей.

А что таят в себе еще более короткие волны? Какие откроются перспективы, если укоротить волны еще в 100, в 1000, в 100 000 раз?

Правда, это не так легко сделать. Магнетроны, клистроны, старые конструкции ламп с бегущей волной — весь этот славный арсенал техники сантиметрового диапазона непригоден для генерации миллиметровых или тем более микронных волн. Не удивительно, что почти 20 лет «потолком» электроники были сантиметровые волны и частоты не выше 10 000 мегагерц.

Но наука и техника никогда не стоят на месте: на свет появились лазеры, и техника совершила (в который раз!) новый гигантский скачок вверх по шкале частот. Недаром эту главу мы начинали словами: история электроники — это история укорочения волн.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

IV. 29

Новые возможности открылись перед локацией и техникой связи в последние годы в связи с освоением светового диапазона, длины волн которого составляют доли микрона.

Как создаются микронные волны?

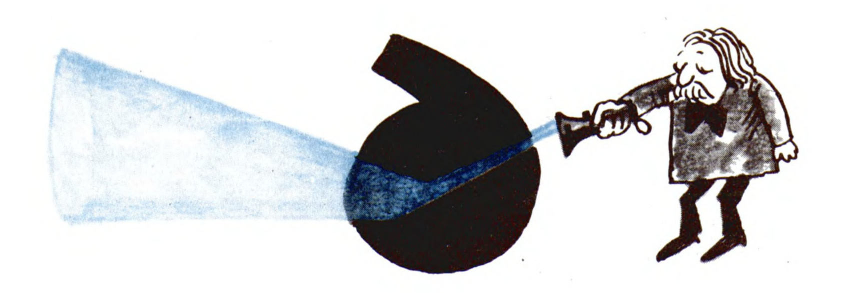
Мы видели, что в генераторах дециметрового и сантиметрового диапазона волн вдоль объемного контура должна уложиться определенная часть стоячей волны (см. IV.13). Это значит, что геометрическая длина резонатора должна быть короче длины излучаемых волн.

Если мы захотим получить с помощью объемного контура волны в 1000 раз короче миллиметровых, нам придется создать такой контур, который можно увидеть лишь в микроскоп. Задача практически неразрешимая. К счастью, природа предоставила нам другую возможность. У нее есть готовые резонаторы, «настроенные» на очень короткие волны. Такими резонаторами являются *атомы* различных веществ.

IV. 30

В обычных условиях атомы газов или кристаллов поглощают световую энергию.

В 1916 году Эйнштейн установил теоретически, что с помощью света можно



привести те же атомы в состояние возбуждения, и они начнут излучать световые волны другой частоты. Возникнет своеобразная «индукция света»: атомы газа или кристалла будут как бы усиливать падающий на них свет.

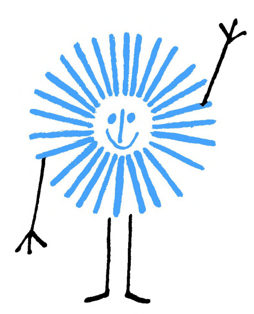
В 1940 году советский ученый-физик В. Фабрикант описал эксперименты, в которых удалось получить интенсивность излученного света, превышающую интенсивность падающих лучей. В 1951 году В. Фабриканту, Ф. Бутаеву и М. Вудынской выдано авторское свидетельство на «Способ усиления электромагнитных излучений (ультрафиолетовых, видимых, инфракрасных и радиоволн)».

В 1954 году Н. Басов и А. Прохоров создали в Советском Союзе первый квантовый генератор.

IV. 31

Основой квантовых генераторов являются процессы поглощения и излучения частиц света — фотонов (потому мы и назвали эту область фотоникой).

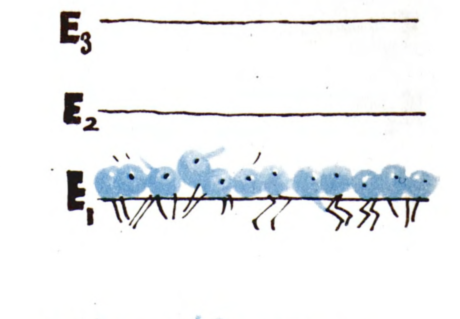
Фотон — это квант (наименьшая порция) световой энергии. Кроме фотонов, в природе существуют другие кванты: квант невидимого электромагнитного поля (то есть радиоволн), квант зву-



ковой энергии (его называют фононом), квант поля тяготения (так называемый гравитон), квант ядерного поля (мезон).

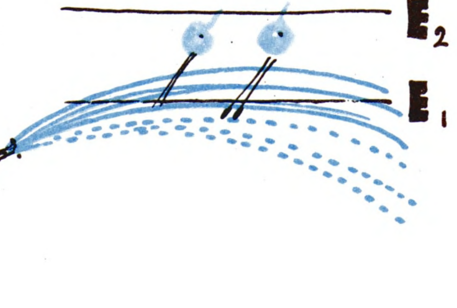


IV. 32



Если атом поглотит фотон, энергия атома увеличится: один из его электронов перейдет с нормальной орбиты, на которой он обладал энергией E_1, на высшую орбиту энергии E_3.

Облучая определенные вещества специальным «сигналом подкачки», можно перевести много атомов с уровня E_1 на уровень E_3. Такой процесс называют возбуждением атомов.

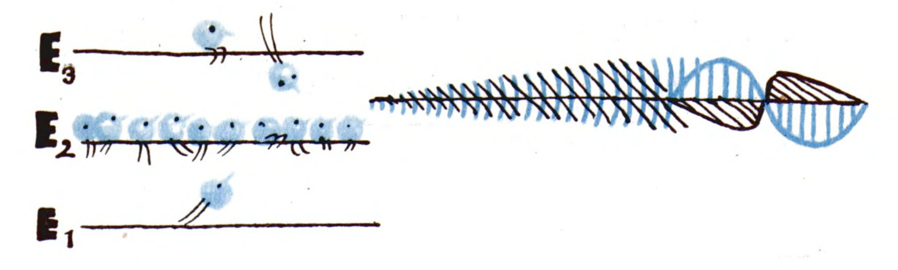


Фотон, поглощенный атомом, нес в себе как раз столько энергии, сколько необходимо атому, чтобы «шагнуть по ступеньке» с E_1 на E_3.

Частота сигнала подкачки, состоящего из этих фотонов, определяется той же самой «ступенькой»: чем выше «ступеньки» (E_3—E_1), тем больше должна быть частота.

IV. 33

В отличие от устойчивого состояния, которому соответствует уровень E_1, состояние возбуждения неустойчиво: атомы легко переходят с уровня E_3 на более устойчивый уровень, например на E_2 (точнее, их электроны «перепрыгивают» с



высших орбит, соответствующих уровню энергии E_3, на нижние).

При этом каждый из атомов излучит по одному фотону, а все вместе они создадут поток электромагнитной энергии — излучат свет.

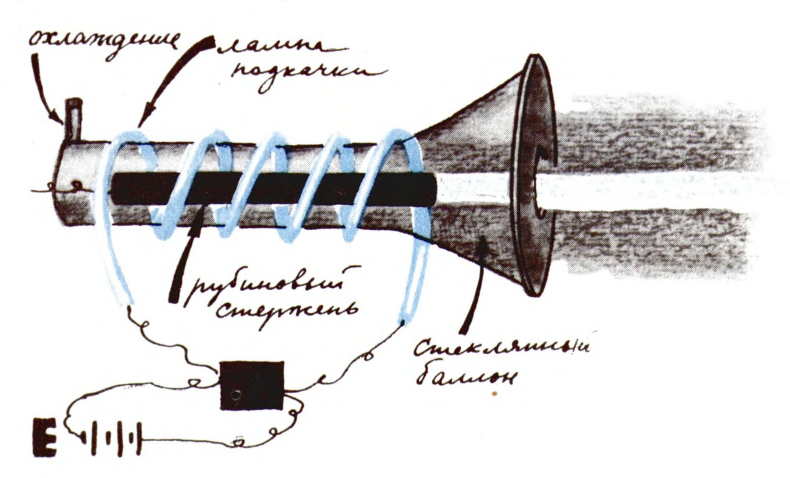
Излучение будет длиться до тех пор, пока все электроны не покинут уровень E_3 — атомы не спустятся на ступеньку E_3—E_2.

Подкачка опять заставит их перебраться на этот уровень, и вслед за этим опять последует импульс излученного света. Время, затраченное на подкачку, намного больше, чем время излучения.

Импульсы, которые излучают современные лазеры, длятся обычно тысячные доли секунды.

IV. 34

Частота излучения лазера зависит от разности уровней E_3—E_2, то есть от той «ступеньки», на которую «спускается» атом, излучивший фотон (см. IV. 33). А частота сигнала подкачки



определяется разностью E_3—E_1 (см. IV. 32).

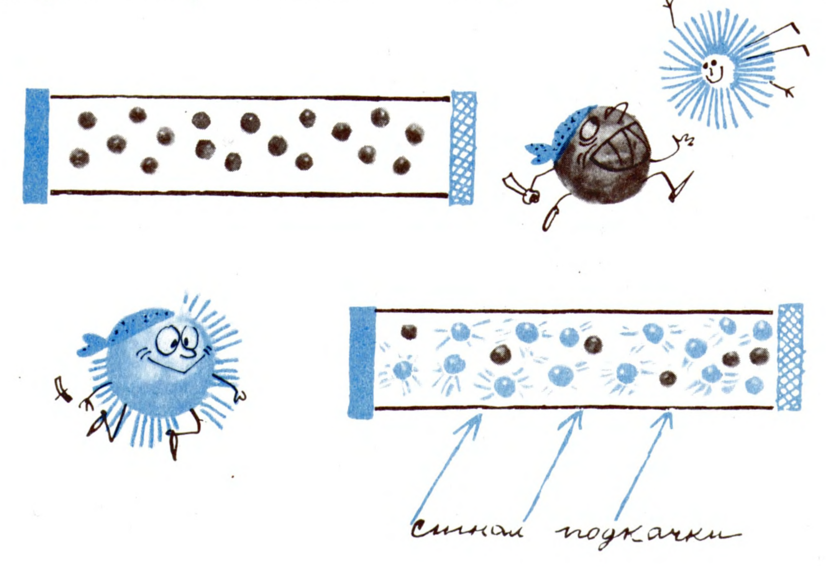
Лазер с рубиновым стержнем излучает свет красного цвета, а сигналом подкачки служит обычно зеленый свет. Частота красного цвета ниже, чем частота зеленого. Соответственно «ступенька» E_3—E_2 меньше «ступеньки» E_3—E_1.

В отличие от обычного контура, размеры которого могут меняться со временем из-за воздействия внешних условий, «контур-атом» или «контур-молекула» обладают чрезвычайно высокой стабильностью.

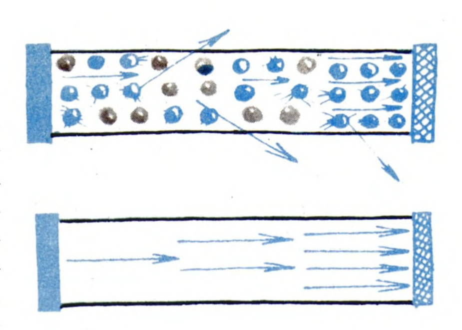
Если использовать частоту их колебаний для измерения времени, то расхождение таких часов с астрономическими часами не превысит одной секунды за... 3 тысячи лет!

IV. 35

До подачи сигнала подкачки все атомы хрома в рубиновом стержне находились на нижней «ступеньке», то есть в устойчивом состоянии (на нашем условном рисунке этому состоянию соответствует черный цвет). Сигнал подкачки снабдил рубиновый стержень фотонами и, возбудив его атомы, перевел их на ступеньку E_3 (возбужденному состоянию атомов на нашем рисунке соответствует синий цвет).



IV. 36

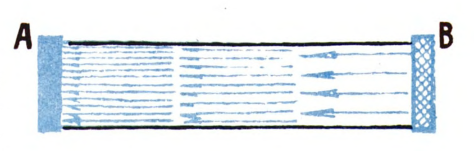


Возбужденный атом хрома может в любой момент излучить фотон. Этот фотон достигнет другого возбужденного атома и, «столкнув» его на уровень E_2, прихватит с собой новый фотон. Два фотона тут же превратятся в четыре, четыре — в восемь и т. д. Возникает «лавина» фотонов, причем все фотоны «шагают в ногу» с одинаковой фазой и частотой.

Некоторые фотоны могут отклониться от оси стержня (на рисунке их путь изображен стрелками). Они очень быстро покинут пределы кристалла, не встретив атомов по пути. Зато те, что движутся по оси, будут без конца встречать по пути все новые и новые возбужденные атомы, каждый раз возвращать их в устойчивое состояние, прихватывая по пути новые фотоны.

Так в направлении, совпадающем с осью кристалла, образуется мощный фотонный поток.

IV. 37

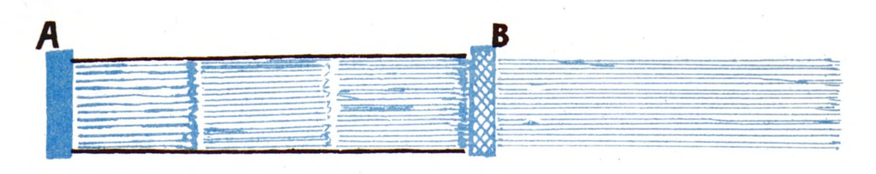


Лавина катится вдоль рубинового стержня, становясь все мощнее за счет новых фотонов, захваченных по пути. Достигнув зеркала *B*, установленного на правом торце стержня, поток отразится и устремится в обратную сторону, продолжая неизменно расти.

У левого края стержня поток снова столкнется с зеркалом *A* и, отразившись, опять устремится к зеркалу *B*.

IV. 38

В отличие от зеркала *A* зеркало *B* обладает некоторой прозрачностью, но первый поток фотонов был слишком слаб для того, чтобы его «пробить». С каждым же пробегом туда и обратно



лавина становится все мощнее, и, наконец, набравшись сил и прорвав полупрозрачное зеркало *B*, фотоны пронижут пространство острым лучом.

IV. 39

Свет, излучаемый лазером, отличается от обычного света тем, что он был возбужден специальным сигналом, и потому все фотоны в нем как бы «шагают в ногу» с одинаковой фазой и частотой.

В этом и заключается главная ценность волн, порожденных фотоникой: обычный свет «разбегается» в разные стороны, а свет лазера идет в одном направлении, в виде ровного и прямого луча.

Лазер, снабженный специальной телескопической линзой, может создать на Луне «зайчик» диаметром всего в 3 километра. Луч же обычного прожектора на таком расстоянии станет таким широким, что в нем уместится 11 дисков Луны.



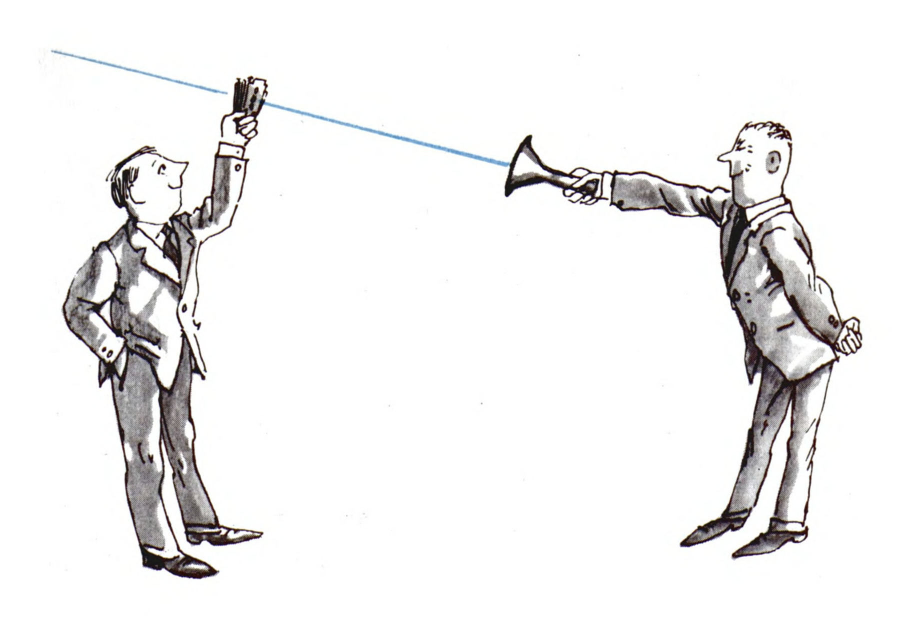
С тех пор, как создали гиперболоид

Около сорока лет назад на страницах фантастической повести Алексея Толстого появилось красивое слово — гиперболоид. Изобретатель гиперболоида Гарин получил световой луч невиданной мощности и решил с его помощью покорить весь мир.

Каждый из нас имел в детстве свой маленький «гиперболоид» — обыкновенную лупу. Луч ее не обладал такой фантастической силой, но в принципе она делала то же, что и прибор, созданный Гариным: солнечные лучи, собравшись в маленький «зайчик», могли оставить след на дереве и скамейке или ожог на руке.

Но вот появились лазеры, и фантастическая идея Толстого обрела реальную почву. «Зайчик», возникший в том месте, куда направлен луч лазера, таит в себе нешуточную опасность: место «зайчика» освещено так, как могли бы его осветить тысячи солнц! Под действием его металл испаряется, а графитовая пластинка раскаляется до 8000 градусов за пять тысячных долей секунды.





Создатели лазеров на первых порах ввели своеобразный способ оценки мощности луча и степени его «концентрированности». Эти величины они измеряли количеством самых обычных лезвий от безопасных бритв. Если направить на лезвие луч, образуется дырочка. Лазер способен прожечь сразу несколько лезвий, а иногда и десятки штук. Чем же не гиперболоид? Едва ли кто-нибудь рискнул бы преградить путь такому лучу!



Но почему гиперболоидом оказался именно лазер? Он «стреляет» фотонами, то есть обычным видимым светом. Но ведь, помимо лазера, есть и другие источники света. Почему для этих же целей нельзя использовать их?

В отличие от излученного лазером света обычный свет обладает очень широким спектром частот. Другими словами, он образуется волнами разной длины. Представьте себе, что кто-то швырнул в озеро много разных камней. Среди них есть большие и малые — от них возникают волны раз-

ной длины, которые складываются друг с другом. Но вместо равномерного чередования гребней и впадин на поверхности озера образуется сложная зыбь.

Сформировать направленные лучи из обычного света не удастся, потому что волны такого света действуют друг на друга по-разному: совпадают то гребни, то гребни и впадины. Получается картина еще сложнее, чем на поверхности озера, в которое бросили множество разных камней. Вот почему специалисты свет, излученный лазером, называют сигналом, а обычный свет, скажем, электрической лампы, с их точки зрения есть не что иное, как шум. Никто, конечно, не слышал, как шумит электрическая лампочка. И все же можно считать ее генератором шума, потому что с точки зрения специалиста шумом является всякий сигнал со случайными амплитудами и широким спектром частот.

Нить электрической лампочки добела раскаляется током. Возбужденные атомы нити находятся на различных энергетических уровнях. Скатываясь с верхних «ступенек» на нижние, они излучают огромную массу фотонов. Но поскольку ступеньки разные, каждый из атомов излучает при этом свою частоту. А вместе они создают широкий спектр излучений, огромное множество разных частот.

Солнце тоже является генератором шума. Каждый квадратный сантиметр его поверхности посылает на землю сигнал мощностью порядка 7 киловатт. Но если мы захотим выделить с помощью фильтра полоску частот в один мегагерц, то от 7 киловатт на выходе фильтра останется только 0,00001 ватта — мощность уменьшится в 700 миллионов раз! Это значит, что на полоску в один мегагерц приходится лишь одна семисотмиллионная доля энергии, а остальная досталась другим частотам спектра, другим многочисленным волнам, образующим солнечный свет.



С помощью призмы, в которой по-разному преломляются эти частоты, можно создать «цветное изображение солнца», то есть выделить из белого света красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый цвета.

А луч лазера одноцветен. Он состоит из волн только одной длины. И в этом его основная ценность: он обладает направленностью, его волны не разбегаются и не гасят друг друга, а идут в одном направлении тонким пучком.

Можно сделать луч лазера еще более острым, если использовать фокусировку. Для этого не потребуется больших рефлекторов или линз. Длина световых волн составляет десятитысячные доли миллиметра (от 0,4 до 0,7 микрона). Даже совсем маленькая линза будет намного больше длины излучаемых волн.

Создавая направленный луч с помощью лазера и используя фокусировку, можно «обстреливать светом» любой дальний объект.

Свет лазера излучается очень короткими вспышками, длящимися тысячные доли секунды. Во время вспышки излучается мощность, измеряемая тысячами ватт. Агентство Ассошиэйтед Пресс уже сообщало о том, что в Америке приступили к созданию генератора, способного на расстоянии двух километров поражать летящий самолет или другую цель. А в космосе тот же луч будет действовать на расстоянии в несколько сот километров, так как там нет атмосферы, ослабляющей световые лучи. Вес и размеры этого генератора будут довольно внушительны. Если Гарин носил свой прибор в чемодане, то проектируемый американцами прибор будет весить около 14 тонн.

А какие лазеры появятся через двадцать лет? Они будут, конечно, и легче и эффективнее. А можно ли будет, направив на ракету «зайчик», прожечь в ней отверстие? Ведь при гигантской скорости достаточно совсем небольшого отверстия, чтобы ракета, потеряв управление, спикировала к земле. Решить эту задачу будет не так-то легко.

Чтобы «зайчик» прожег отверстие, луч должен быть жестко привязан к быстро летящей ракете. А для этого надо мгновенно перестраивать фокусировку, следя за траекторией полета ракеты.

Каким же должен быть «зайчик»? Немецкий ученый Тирринг проделал такой расчет. Чтобы в течение одной минуты расплавить корпус ракеты, необходима мощность около 800 киловатт. Даже в том случае, если угол, на который расходится сфокусированный луч, составляет только одну угловую минуту (для сравнения скажем, что диск восходящего солнца виден под углом 10 минут), на высоте 50 километров «зайчик» окажется шире, чем площадь сечения головной части ракеты, приблизительно в 200 раз. Ракете достанется

только $^1/_{200}$ часть энергии лазера. Значит, в течение целой минуты мощность излучения лазера должна составлять

$$800 \cdot 200 = 160\,000 \text{ киловатт.}$$

А мощность излучения современного лазера составляет в среднем лишь милливатты. Вывод неутешительный: чтобы луч поразил ракету, надо повысить мощность лазеров больше чем в 100 миллионов раз! Расчет простой, но убедительный. Едва ли в ближайшем будущем удастся сделать «гиперболоид», который сможет быть эффективным средством против ракет.

Как модулировать свет?

Заманчиво было бы превратить направленный луч лазера в несущий сигнал! 30 миллионов телепрограмм можно было бы передать на световых несущих сигналах.

Однако для передачи какой-нибудь информации с помощью лазера надо еще научиться «наносить на канву узоры»: импульсы кода, телевизионные кадры, спектр звуковых частот.

Вот здесь и возникает проблема. В самом деле, как модулировать свет? «Кривые зеркала» электроники не решают этой проблемы; в основе «зеркал» лежит воздействие поля управляющей сетки на электронный поток. А как воздействовать на фотоны? Ведь они не имеют заряда, значит любое поле им нипочем. Как же выйти из этого затруднительного положения?

Обратив внимание на различные случаи воздействия поля на оптические свойства вещества, физики сразу нащупали правильный путь.

Вот цепочка их рассуждений и действий. Звуки, импульсы, изображение превращаются в электрический ток. Ток создает поле. Поле воздействует на кристалл, вызывая изменение его оптических свойств. Луч же лазера может пройти сквозь кристалл или отразиться им. Значит, если на кристалл воздействовать переменным полем, луч станет менять свою интенсивность и на несущем сигнале лазера появится нужный «узор». Здесь «кривое зеркало» — это уже не просто художественный образ, — ведь свет требует для модуляции настоящих зеркал. И они действительно должны быть «кривыми» — под воздействием поля они искажают свет.

Физики знают много разных явлений (или, как они любят

выражаться, эффектов), позволяющих воздействовать полем на свет. Например, эффект Фарадея, сущность которого состоит в том, что под воздействием магнитных полей изменяется поляризация света *. Или эффект Зеемана: под воздействием внешнего поля меняется спектр проходящего через кристалл светового луча. Таким способом сигнал лазера модулируют по частоте. А вот эффект Керра (преломление лучей и изменение поляризации под действием электрического поля), который позволяет осуществлять модуляцию световых несущих сигналов, превратив модулирующие сигналы в переменные электрические поля.

Свет можно модулировать звуком. В этом случае волны звука будут деформировать кристаллическую решетку и изменять тем самым оптические свойства среды, по которой распространяется свет.

Наконец, в самом лазере можно изменять интенсивность подкачки и таким способом влиять в определенных пределах на интенсивность светового сигнала и на его частоту.

Но вот модулированный сигнал лазера достиг приемника. Как известно, в нем необходимо осуществить детектирование, то есть отделить «узор» от «канвы». Делать это можно, использовав фотоэлектрический эффект, при котором ток фотоэлемента зависит от яркости освещения. Детектирование сводится к простому явлению: модулированный луч меняет свою интенсивность, а в цепи фотоэлемента изменяется ток.

Тот же эффект используется для преобразования частоты светового сигнала. Сигнал лазера-передатчика смешивается в фотоэлементе с сигналом лазера-гетеродина **, а на выходе выделяется разностная частота. Остальная часть схемы не отличается от схемы обычных супергетеродинных приемников, потому что в результате преобразования частота светового сигнала понижается до радиочастоты.

Работы, связанные с модуляцией и детектированием светового сигнала, сейчас ведутся широким фронтом. Физики ставят эксперименты. Ведется сравнение результатов. Оценивается пригодность описанных методов для различных сигналов и модулирующих частот. Ученым еще предстоит большая работа над проблемами модуляции света, чтобы для разных практических целей среди всех известных эффектов найти наиболее «эффективный эффект».

---

* С понятием поляризации читатель встречался в главе III (см. III.18).

** О роли гетеродина было рассказано в главе «Электроны, волны, поля» (раздел «Королевство кривых зеркал»).

На повестке дня

...В клинику прибыл новый больной. Рентген показал, что срочное хирургическое вмешательство крайне необходимо. Хирург готов начать операцию. Но в руках его нет режущих или колющих инструментов, вместо них он берет в руки какой-то необычный прибор. Затем внимательно всматривается в рентгеновский снимок, очень тщательно измеряет по нему расстояние от поверхности тела больного до оперируемого поля и соответствующим образом настраивает прибор. Потом нажимает кнопку, и тело больного пронизывает тонкий луч света.

Операция закончена, но на теле оперируемого нет ни одной капли крови и вообще никаких следов операции. Оказывается, луч проник внутрь тела, не повредив ткани, и прижег ее только там, где он сфокусирован, то есть как раз на оперируемом поле!

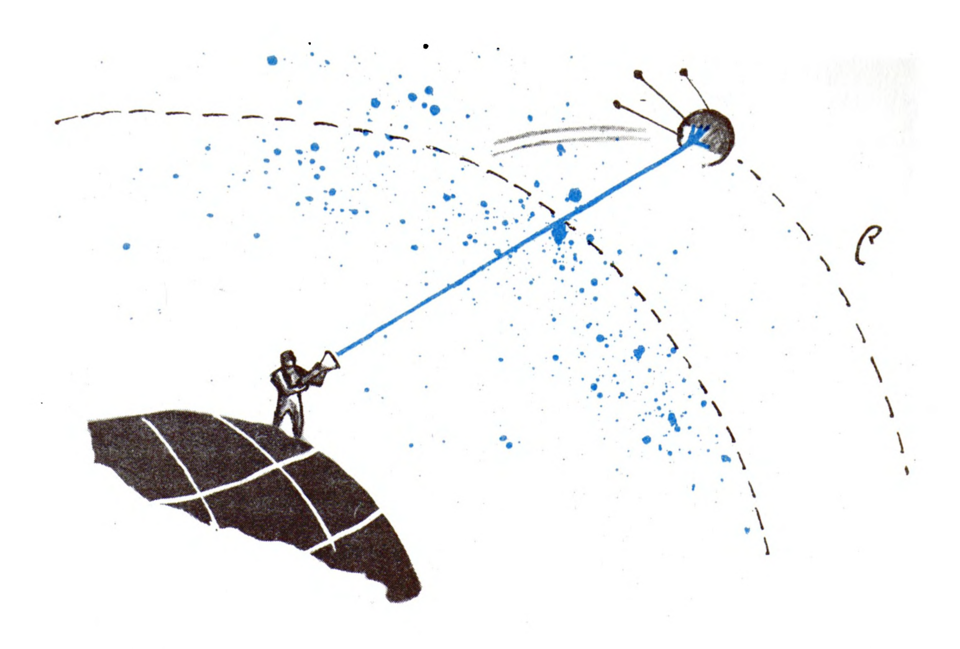
Фантастика? Пока — да. Но в ближайшем будущем все это, очевидно, станет реальным.

Ведь мощность излучения лазера можно подобрать таким образом, чтобы она была безопасной всюду, кроме той точки, где фокусируется луч. Эта точка будет подобна концу острой иглы. Причем этой иглой не надо пронзать тело больного — «острие» сразу окажется там, где надо прижечь нездоровую ткань.

Подобные опыты уже проводились: лучом лазера удалось «приварить» в глазу кролика отслоившуюся сетчатку, не повредив чувствительных тканей зрачка.

О возможностях, которые открывают для науки и техники лазеры, можно говорить без конца. Фотон оказался опасным соперником электрона не только в локации или связи, но и в производственных сферах. С появлением лазеров металлы и прочие материалы можно будет обрабатывать не только электронным, но и фотонным лучом. Кроме того, острый луч лазера позволит «прощупывать» микроскопические детали, получая их изображение на фотопластинке, точно определяя их размеры.

Но этого мало: оказывается, под воздействием такого луча молекулы определенных веществ приобретают повышенную химическую активность. Меняя частоту излучений, можно возбуждать молекулы различных веществ. Это значит, что в сложные химические процессы можно вносить необходимые «коррективы», ускоряя одни реакции и не влияя на ход остальных. Тем же лучом можно разрывать связи между мо-



лекулами, то есть менять по своему усмотрению структуру различных веществ.

А вот еще одна перспектива: передача энергии без проводов. В самом деле, ведь узкий луч — сам по себе провод; в нем сосредоточена вся энергия, которую можно доставить по назначению, не растеряв в пути.

Есть и другие проекты. Свет оказывает давление — русский ученый Лебедев доказал это еще 70 лет назад. Но если давление обычного света улавливают лишь чувствительные приборы, то каким оно будет в мощном и узком луче? Подсчитано, что давление в луче лазера измеряется миллионами атмосфер.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

IV.40

Во многих областях техники найдут себе применение создаваемые с помощью лазеров тонкие, концентрированные, остронаправленные световые лучи. Широко будут использоваться лазеры для обеспечения связи с космическими объектами. Правда, непосредственная связь между Землей и космосом весьма затруднительна, потому что свет рассеивается облаками, туманом, снегом, дождем. Лазер придется устанавливать на спутниках, а обычные радиостанции свяжут спутник с Землей.

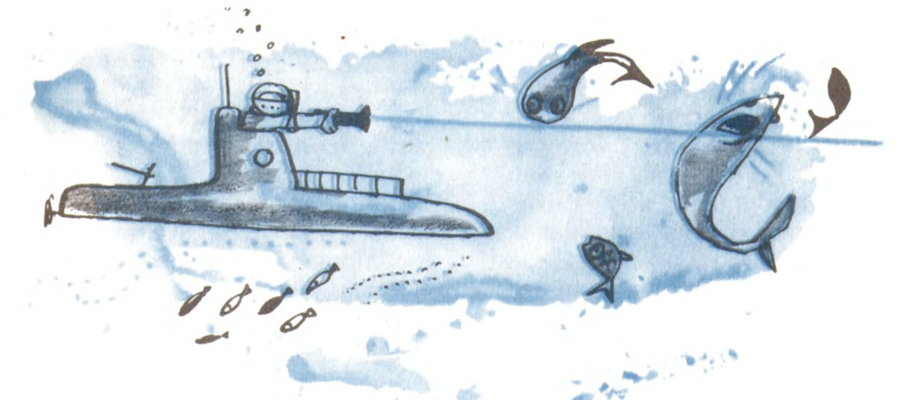
IV.41

Луч, посланный лазером в космическое пространство, придет точно по назначению.

Для связи с Марсом обычная радиостанция должна обладать мощностью, измеряемой миллионами ватт, а лазеру достаточно всего одного ватта — меньше мощности карманного фонаря!

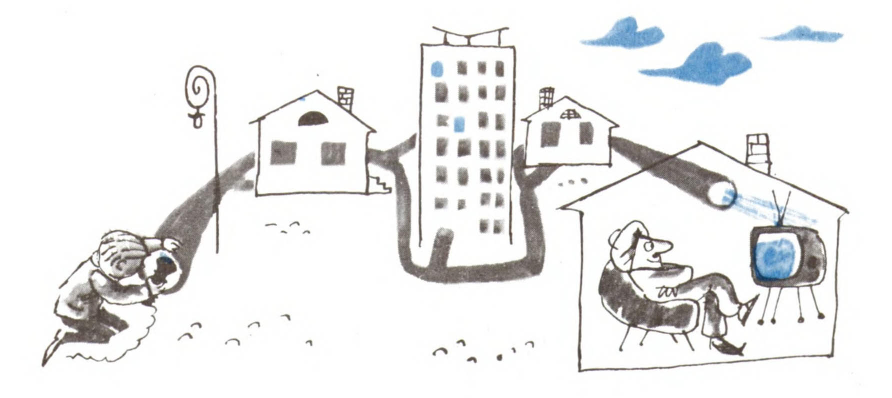
IV.42

Лазеры смогут оказать большую услугу не только космической, но и подводной связи. Обычные радиоволны в воде ослабляются очень сильно, поэтому в подводной связи и в подводной локации сейчас применяется ультразвук. Свет тоже плохо проходит сквозь воду, но световые волны, длина которых соответствует голубому и зеленому цветам, морская вода пропускает свободно — этим и объясняется ее специфический цвет.



IV.43

Световые сигналы, которые будут использоваться в качестве несущих сигналов для звуковой и телевизионной связи, необходимо защитить от влияния атмосферы. По всей видимости, для этих сигналов создадут специальные трубы, а для изменения их направления в трубах будут стоять зеркала.



IV.44



У электроники стадия «детских болезней» давно уже кончилась, а у фотоники она только еще началась.

Вы помните, как труден был переход от искровых передатчиков к непрерывному излучению волн? Нечто подобное происходит сейчас и с лазером. Подкачка осуществляется вспышками. После очередной вспышки лампы подкачки лазер излучает импульс, длящийся тысячные доли секунды. Создание непрерывной подкачки является сложной проблемой: если увеличить мощность подкачки, то лазер станет сильно перегреваться, придется применять охлаждение, сооружая громоздкие и сложные системы.

Недавно удалось создать несколько типов лазеров с непрерывным излучением волн.

IV.45

Огромную помощь в изучении космоса оказывают молекулярные и парамагнитные усилители. Принцип их действия во многом сходен с принципом лазера. Так же как в лазере, с помощью внешней энергии молекулы вещества возбуждаются и «поднимаются на ступеньку» $E_3—E_1$ (см. IV. 32).

Но если в лазере вслед за этим атомы самостоятельно (как говорят, спонтанно) переходят на более низкий уровень, излучая фотоны, то в усилителе (молекулярном или парамагнитном) надо создать для этого новый толчок. Таким толчком и является тот сигнал, который надо усилить.

Частота усиливаемого сигнала должна соответствовать величине той «сту-

пеньки», с которой «упадет от толчка» молекула вещества (E_3—E_2). Получается так, будто контур усилителя (то есть молекула) настроен в резонанс с усиливаемым сигналом.

Как в молекулярных, так и в парамагнитных усилителях возбужденное состояние среды (кристалла, раствора, газа) создается под воздействием электромагнитных полей.

А различия связаны с тем, что возбуждение обусловлено разными физическими процессами. Если в молекулярных усилителях электроны при возбуждении переходят с орбиты на орбиту, то в парамагнитных усилителях при возбуждении электроны остаются на прежних орбитах, но изменяется магнитное состояние молекул облучаемого парамагнитного вещества.

IV.46

Главным преимуществом квантовых усилителей является отсутствие внутренних (собственных) шумов. Ведь в ламповых усилителях собственные шумы порождаются тепловым движением электронов. Парамагнитное же усиление осуществляется при очень низких температурах — минус 269 градусов Цельсия,— что почти равно абсолютному нулю. А при нем тепловое движение практически замирает. Кроме того, каждый фотон содержит так мало энергии, что даже при их хаотичном движении создать собственные шумы им не удается. Поэтому парамагнитным усилителем можно усилить сигнал в сотни и тысячи раз больше, чем ламповым, не боясь, что сигнал «утонет» в шумах. И если современный приемник на лампах может дать усиление в 10^{14} раз (в сто триллионов!), то приемник с квантовым усилителем позволяет усилить сигналы еще в тысячи раз.



Говорит вселенная!

В последние годы специалистов по электронике все чаще и чаще волнуют проблемы космического масштаба.

И это естественно: ведь прогресс каждой области науки и техники всегда служит толчком для развития смежных с ней областей.

В связи с освоением космоса были созданы сверхчувствительные приемники и надежные электронные схемы, обеспечивающие вывод космических кораблей на орбиту и связь между кораблем и Землей.

Овладев с помощью электроники огромным диапазоном волн от микрона и до километров, человек задается вопросом: а нельзя ли использовать эти волны для связи с жителями других миров? Ведь есть же где-то в бесконечных просторах вселенной наши собратья по разуму, которые умеют излучать и принимать сигналы не хуже, чем мы!

Что говорить, заманчиво было бы вступить с ними в общение и познакомиться с цивилизацией, которая, возможно, опередила нашу, скажем, на несколько тысяч лет!

В будущем, может быть, удастся даже летать в гости к жителям соседних галактик, а пока хорошо получить хотя бы короткую весточку, какой-нибудь ответный сигнал. Дескать, знаем о вашем существовании и согласны с вами дружить.

Мечта эта родилась еще задолго до появления электроники. В то время обсуждались разные способы связи. Хотели построить огромное зеркало, способное создать «зайчик» на Марсе. По замыслу авторов этим зайчиком надо было выжечь на поверхности Марса какой-нибудь математический знак. Были другие проекты: например, предлагалось создать гигантский знак на Земле. Знаменитый математик Гаусс считал, что для этой цели очень подходит Сибирь. Он предлагал засадить этот знак пшеницей, желтый цвет которой будет хорошо виден на фоне зеленой тайги. Другие считали, что этот знак нужно соорудить в пустыне Сахаре.

Ни одному из упомянутых проектов не суждено было осуществиться. Появление радио дало новую почву старой мечте. От жителей вселенной стали ждать теперь радиосообщений. И вот...

Сенсация! Сигналы из космоса! Американский инженер Карл Янский уловил сообщения, повторяющиеся ровно через 23 часа 56 минут!

Увы, исследование этих сигналов принесло разочарова-



ние тем, кому не терпелось наладить межпланетную связь. Оказалось, что эти сигналы посылают вовсе не люди. Электромагнитные волны излучают Луна и Солнце, Меркурий, Юпитер, Сатурн. Удалось принять излучения естественных «радиостанций», удаленных от нас на миллиарды световых лет.

Жажда общения с жителями вселенной осталась неудовлетворенной. Зато появилась новая область применения электроники — радиоастрономия.

«Я — Земля! Как меня слышно?»

Ну что ж, если наши собратья по разуму не торопятся присылать сообщения, может быть, дать им знать о себе?

В 1960 году был послан сигнал из Америки на волне 21 сантиметр. Преодолев расстояние в 100 триллионов километров, этот сигнал должен прийти к звездным системам Тау Кита и Эпсилон Эридана спустя 11 лет. И если жители одной из планет этой системы уловят сигнал и захотят вступить с нами в общение, то мы получим ответ в 1982 году. Даже коротенькая «беседа» с жителями вселенной должна, как ви-

дите, длиться достаточно долго: за целых 22 года один вопрос и один ответ.

Много ли шансов завязать такую беседу? Если там есть разумные жители, имеются ли у них чувствительные приемники? Будут ли они настроены как раз на эту волну?

Трудно что-либо предрекать. Но, выбирая волну в 21 сантиметр, ученые преследовали вполне конкретную цель. Дело в том, что на такой волне посылают сигналы атомы водорода. Это происходит всякий раз, когда у частиц внутри атома водорода изменяется магнитный момент. У каждого атома такое явление повторяется в среднем раз в 11 миллионов лет. Но количество распыленного в космосе водорода так велико, что в каждый момент времени где-нибудь да происходит это редкостное явление, и потому из любой части вселенной непрерывно идут сигналы с длиной волны 21 сантиметр.

Все межзвездное пространство заполнено водородом. Принимая сигналы атомов водорода, астрономы следят за тем, что творится вокруг. В частности, удалось наблюдать катастрофу двух гигантских галактик — было сделано предположение, что столкнулись «антимиры».

Ну хорошо, а при чем здесь другие цивилизации? Почему решили ученые, что они услышат нас именно на этой волне?

Они рассуждали так: любая цивилизация, достигшая нашего уровня развития или тем более опередившая нас, должна интересоваться вселенной и ловить сигнал водорода с волной 21 сантиметр. Значит, у них должны быть приемники, настроенные на эту волну. Достаточно с помощью модуляции дать соответствующую «окраску» сигналу, и его можно будет легко отличить. «Те люди» поймут, что это идут позывные, и начнут посылать ответ.

Подтвердятся ли эти предположения? Посмотрим. Ждать осталось не так уж долго — всего каких-то 15 лет.

Второе дыхание астрономии

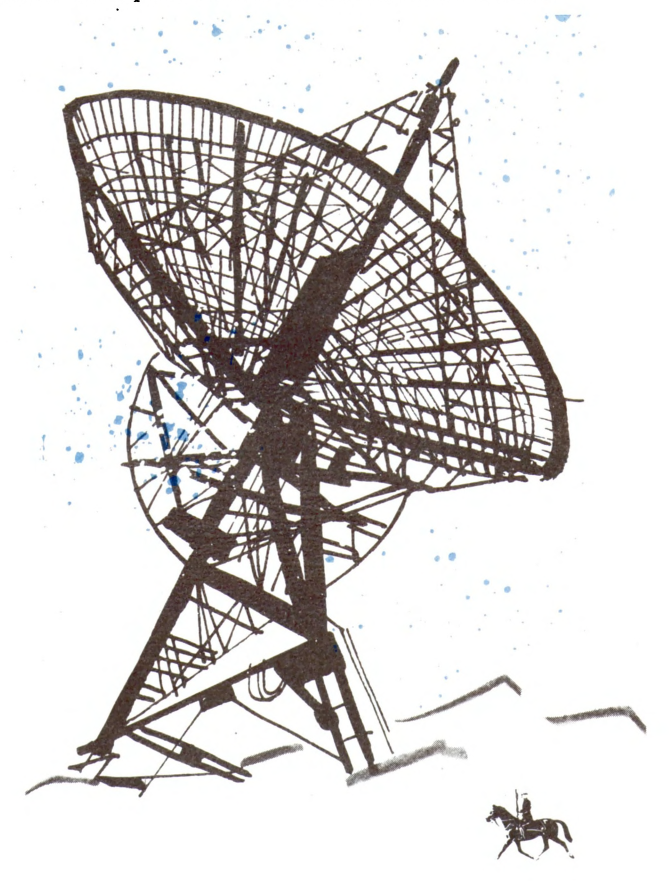
У спортсменов бывают такие моменты, когда кажется, что силы уже на пределе. И тут наступает второе дыхание.

Нечто подобное произошло с астрономией. Все, что доступно для наблюдения через оптический телескоп, было изучено досконально. А бесконечные дали вселенной манили обилием неразгаданных тайн. Но как быть, если исчерпаны все возможности телескопов и заглянуть дальше нельзя? И вдруг — второе дыхание. Точнее — второе зрение.

На помощь оптическому телескопу пришел радиотелескоп.

Космическое пространство оказалось насыщенным излучениями всевозможных частот. Множество естественных радиостанций излучает эти сигналы. Волны длиной от 8 миллиметров до 12 метров излучает в пространство Солнце. На волне 1,25 сантиметра «работает» наша Луна. Гигантские скопления водорода непрерывно излучают сигналы на волне 21 сантиметр. Все волны с длиной от 1 сантиметра до нескольких метров проходят сквозь атмосферу Земли.

Гигантские зеркала антенн радиотелескопов с диаметрами до 100 метров непрерывно прощупывают пространство, следя за всем, что происходит вокруг. Вид этих зеркал многим покажется странным: какое же это зеркало, если оно сплошь состоит из дыр?! Для облегчения этих зеркал их действительно делают из решеток. Почему же в отверстия этой решетки не просачивается пойманная волна?



Мы с вами привыкли иметь дело с обычным зеркалом, предназначенным для отражения оптических волн. Волны же, которые ловят антенны радиотелескопов, обычно бывают длиннее оптических в несколько сот тысяч раз. А поскольку размеры отверстий в зеркале много меньше длин этих волн, для них это зеркало будет таким же ровным и гладким, как обычное зеркало для оптических волн с длиной в доли микрона.

Зеркало отражает приходящие волны, фокусируя их на антенне. С помощью этих устройств удалось обнаружить множество неизвестных галактик на таких расстояниях, откуда свет достигает Земли через 6 миллиардов лет!

Радиоастрономия обладает не только удивительной дальнозоркостью, но и способностью видеть насквозь.

Есть уголки вселенной, которые спрятаны за слоем космической пыли, непроницаемой для световых лучей. А для электромагнитных волн эта ширма оказалась прозрачной.

С помощью радиотелескопов обнаружили в центре нашей Галактики неизвестные раньше скопления звезд, а сама Галактика оказалась по форме близкой к спирали. Впрочем, именно такое строение и предрекала теория еще до того, как его удалось наблюдать.

Огромную роль в развитии радиоастрономии сыграли квантовые усилители (молекулярные и парамагнитные — см. IV. 45 и IV. 46). Они позволяют принимать пришедший из дальнего космоса чрезвычайно слабый сигнал. Собственно, только для этих целей они и пригодны, а для обычной радиосвязи чересчур... хороши.

Звучит несколько странно, и тем не менее специалисты пришли к такому парадоксальному выводу. Дело в том, что усилители эти настолько чувствительны, что любое тело, излучающее тепловые (инфракрасные) волны, стало для них источником очень заметных помех. Только в том случае, когда антенна приемника смотрит в холодный космос, можно эффективно использовать то усиление, которое он может дать.

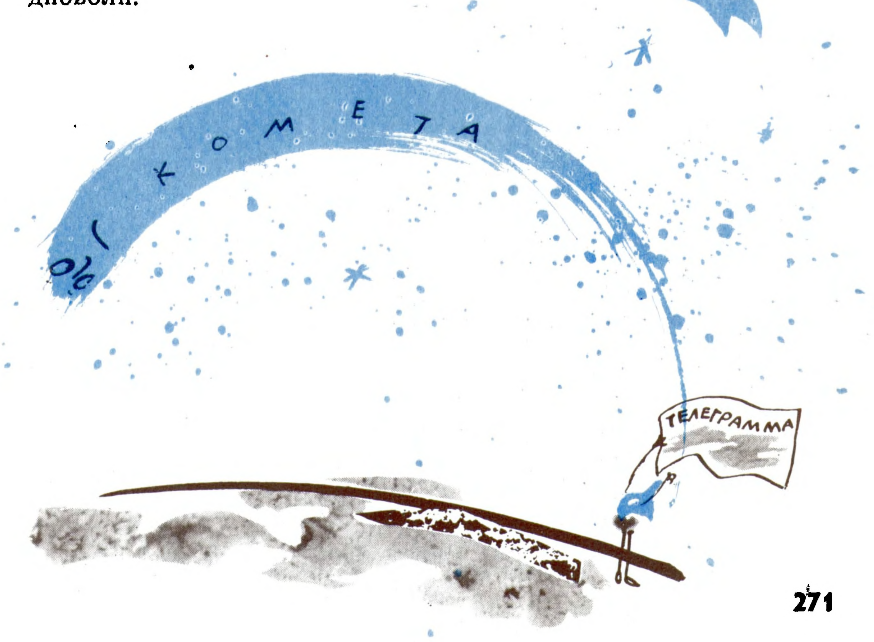
В городе Сан-Фернандо (США) был установлен радиотелескоп для наблюдения невидимых простым телескопом погасших звезд. Он оказался настолько чувствительным, что замечал всех пролетающих насекомых, воспринимая тепло их крошечных тел. В радиусе 15 метров вокруг телескопа нельзя было закурить сигарету, не нарушая прием.

Те космические объекты, которые сами не посылают сигналов, можно «прощупывать» отраженной волной. Для локации эта задача оказалась по силам, несмотря на довольно

далекие и не совсем обычные цели. Пришлось разработать специальные станции, излучать импульсы значительно реже, зато делать их помощнее. Такие сигналы помогли уточнить состав Луны и Венеры, а заодно измерить до них расстояние — на то и локация, чтобы с точностью до нескольких километров зафиксировать даже очень далекую цель. А в Физическом институте имени П. Н. Лебедева создан специальный лазер, которым из Крымской астрофизической обсерватории производили локацию Луны.

На хвосте метеоров

Электроника помогла астрономии. И астрономия не осталась в долгу. В частности, она помогла исследовать условия распространения электромагнитных волн в атмосфере в зависимости от состояния Солнца и прочих небесных тел. И кое-что предложила для надежной связи на дальние расстояния. Установлено, что космос непрерывно обстреливает Землю целым градом метеорных частиц. Врезаясь в атмосферу, метеоры быстро сгорают, но некоторое время сохраняется возникающий на их траектории ионизированный след. Если вес метеора составляет хотя бы стотысячную долю грамма, след будет достаточно плотным для отражения радиоволн.



Нельзя ли принимать радиоволны, отраженные от этих следов? Будет ли такая связь постоянной или придется ждать, когда удастся «поймать метеоры за хвост»?

Метеорный дождь идет непрерывно. Каждые сутки в атмосфере сгорает около 10 миллиардов метеоров, обладающих весом в стотысячные доли грамма.

Но для связи годится не каждый посланник космоса. Они могут летать в любом направлении, а от траектории будет зависеть расположение их хвостов. Надо дождаться такого хвоста, от которого отраженные волны пойдут в том направлении, где их ждет приемная станция.

Пока нет подходящих условий, станция дальней связи автоматически записывает сообщения на магнитную ленту, следит за состоянием атмосферы и ждет, когда в небе возникнет удобный для связи след. Стоит ему появиться, как станция спешит передать все сообщения, которые она накопила. Вместо ста слов в минуту, передаваемых при обычной радиосвязи, такая станция передает за ту же минуту приблизительно полторы тысячи слов. Такая «скороговорка» позволяет передать за короткое время все сообщения, которые были получены станцией, пока не было подходящих метеорных хвостов.

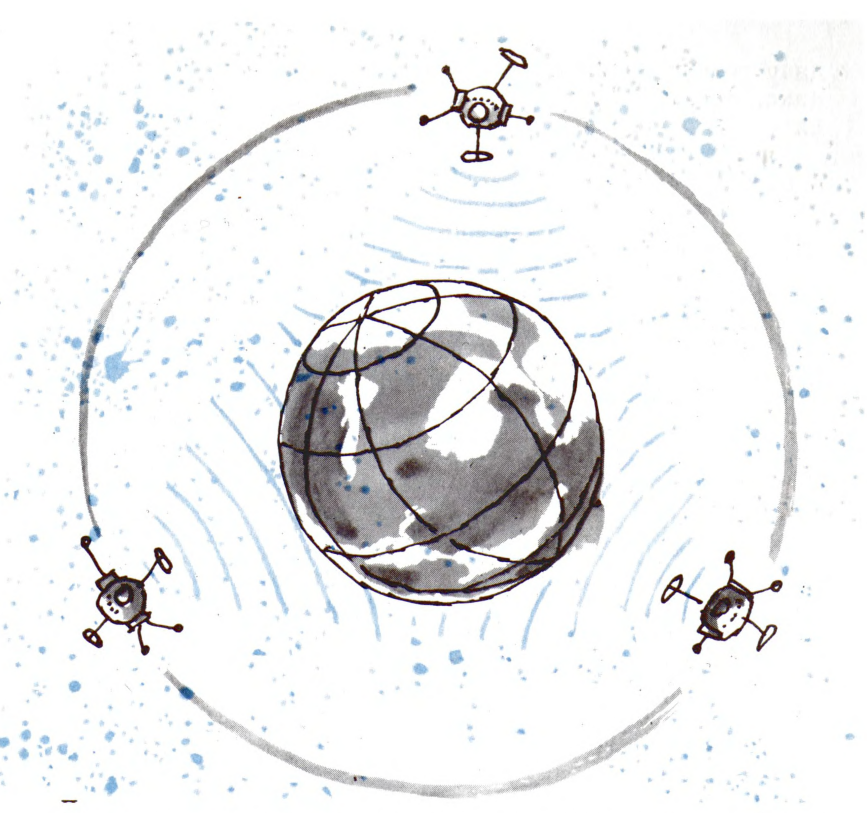
За запретной чертой телевидения

Мы уже убедились, что космос может помочь электронике в решении многих земных проблем. К их числу относится проблема дальнего телевидения. Прямая видимость ограничивает дальность приема телевизионных сигналов. Горизонт является запретной чертою. Как же преодолеть эту черту?

Ретрансляция — способ вполне надежный. На расстоянии прямой видимости устанавливаются ретрансляционные станции, которые принимают и вновь излучают сигнал.

Сразу ясно, что стоит это не дешево: через каждые 100 километров — станция, на расстоянии 10 тысяч километров их понадобится около ста. Да хорошо еще, если сигнал путешествует по суше, а как быть, если на пути океан?

Можно послать сигнал и по кабелю, но в кабеле он быстро теряет энергию. Тогда на пути надо устанавливать усилители. И если ретрансляционные станции сооружаются через каждые 100 километров, то усилители в кабельной линии приходится ставить через 25—30 километров. Опять не дешево, да и надежность такой линии связи невысока.



Для увеличения дальности можно антенну ретрансляционной станции поставить повыше. Тогда предел прямой видимости станет намного больше, горизонты раздвинутся и станция сможет обслуживать район побольше. Не случайно французы используют для ретрансляции самое высокое свое сооружение — знаменитую Эйфелеву башню.

А Италия и Швейцария общаются через Альпы: антенны для ретрансляции установлены на вершинах Юнгфрау (4166 метров), Монте Женерозо (1701 метр) и в городе Шассерель, расположенном на высоте 1609 метров над уровнем моря.

Американцы пытались проблему дальнего телевидения решать по-другому: создавать «искусственную ионосферу» с помощью специальных ракет. Взрыв, произведенный на высоте 100 километров, рождал облако атомарного калия. Это облако, ионизированное солнечными лучами, отражало телевизионные волны в течение полутора-двух часов. Ясно, что в специальных случаях этот способ вполне приемлем. Но едва ли можно таким образом обеспечить ежедневную пере-

дачу телевизионных программ. Тем более что ионизация облака, осуществляемая солнечными лучами, тоже непостоянна — зашло Солнце, и прекратилась связь.

А вот с помощью спутников эту проблему можно решить кардинально! Ретрансляторы, установленные на трех разнесенных на 120 градусов спутниках, обеспечат всемирную телевизионную связь. Если правильно выбрать орбиту (расчетная высота составляет 35 800 километров), каждый спутник будет «привязан» к определенной точке экватора: число оборотов спутника совпадет с числом оборотов Земли.

Проведены первые опыты. 26 июля 1963 года американская ракета «Тор» вывела на орбиту, близкую к расчетной, ретрансляционный спутник «Синком-2». С помощью этого спутника передавались фотокадры из порта Лейкхерст штата Нью-Джерси, на корабль «Кингспорт», плывший в Нигерию, к африканскому острову Лагос.

Советские спутники «Молния» позволили транслировать телевизионные передачи из Москвы на Дальний Восток.

При осуществлении «Интервидения» с помощью спутников придется столкнуться с рядом еще не решенных проблем. Как, например, передать вечерний концерт в то место земного шара, где в этот момент царит глубокая ночь? Очевидно, программы придется сначала записывать на магнитные ленты, а транслировать позже, с наступлением дня.

Спутники смогут помочь не только телевидению, но и обычной радиосвязи. Дело в том, что в диапазоне волн от 10 до 2000 метров с каждым годом становится все теснее. Отсюда естественное желание расширить диапазон радиосвязи вплоть до сантиметровых волн. Но тут есть одно неудобство: волны короче нескольких метров не отражаются ионосферой, и горизонт является той границей, которую эти волны не могут «перешагнуть». Вот тут и приходят на помощь спутники. Установив ретранслятор на спутнике, можно принять радиопередачу на сантиметровых волнах и направить ее со спутника в дальнюю точку Земли...

Вверх по шкале частот шагает не только сама электроника, но и те области техники, которые связаны с электроникой: радио стало осваивать сантиметровые волны, а телевидение хочет использовать лазеры и работать на волнах длиной в десятые доли микфона.

ГЛАВА V

элементы «умных» машин

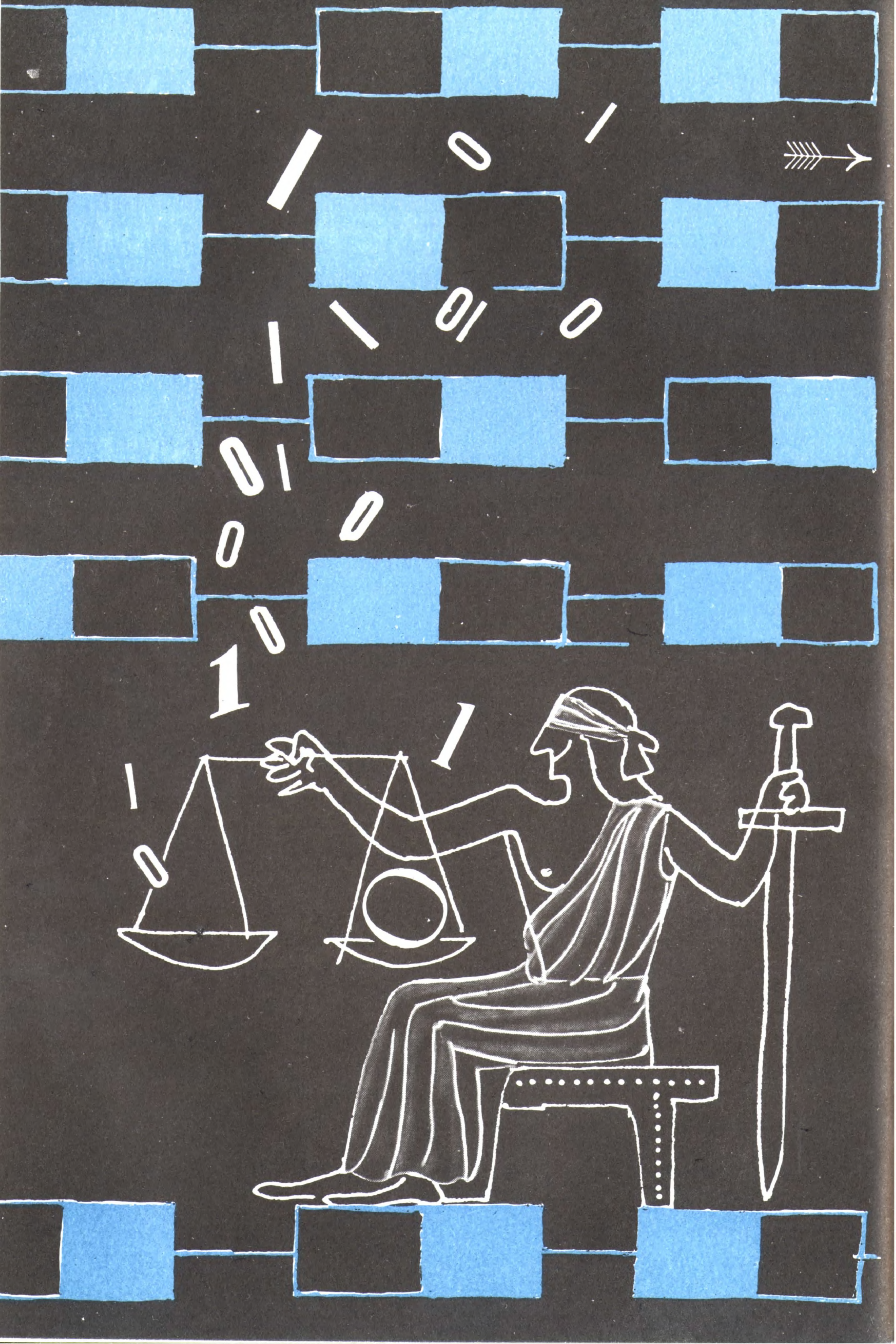
Как из простых

электронных ячеек

создаются сложные

схемы «умных»

машин.



ДВЕ ЧАШИ ВЕСОВ

V.1

Еще на первом этапе жизни, можно сказать, с самого раннего детства, триод уже был знаменит (ну, например, так же, как Робертино Лоретти). Но слава его была в то время односторонней: главным его достоинством считалась способность служить электронным ключом. Если вы помните, сначала его даже постеснялись называть лампой, а был он известен под именем «пустотного реле». Со временем «талант» триода оказался куда более разносторонним: он стал усилителем, генератором, модулятором, детектором, смесителем — короче, справлялся со всеми задачами (в определенном частотном диапазоне), которые выдвинула радиосвязь.

С появлением импульсной техники вновь пришлось вспомнить о триодах-ключах. И теперь во всех схемах локаторов стоят триоды. А в электронных вычислительных машинах триоды-ключи применяются сотнями тысяч штук.



V.2

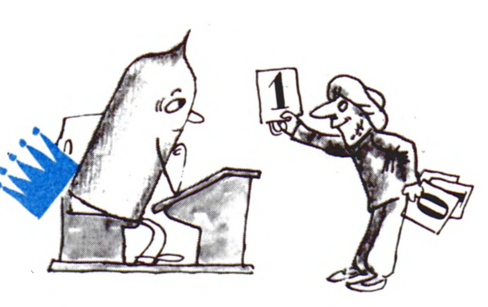
Всем известно, что электронно-вычислительная машина является родоначальником класса «умных» машин. Потому ключи ей нужны тоже «умные». Чтобы не отстать от жизни, триоду пришлось подучиться: он овладел логикой и освоил двоичный счет.

У триода логика простая: либо он отперт, либо он заперт. В первом случае он отвечает «да», а во втором — «нет».

Пусть, например, триод заперт. К нему (на его сетку) пришли сразу два импульса (*А* и *В*). Он открывается и дает ответ «да». Тем самым он подтверждает, что действительно импульсы были, причем сразу оба: и *А* и *В*. А если придет лишь один какой-нибудь импульс? Оказывается, все дело в электронной радиотехнической схеме. В данном конкретном случае она у нас такова, что каждый импульс в отдельности триода не отпирает. Достигается это подачей отрицательного потенциала на сетку.

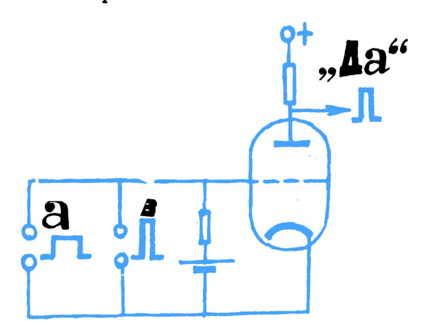
Импульс может обозначать все что угодно, то есть любые события *А* и *В*. Например, если погода хорошая (*А*) и есть свободное время (*В*), можно пойти погулять («да»). А если одно из условий не выполняется, то гулять не придется («нет»).

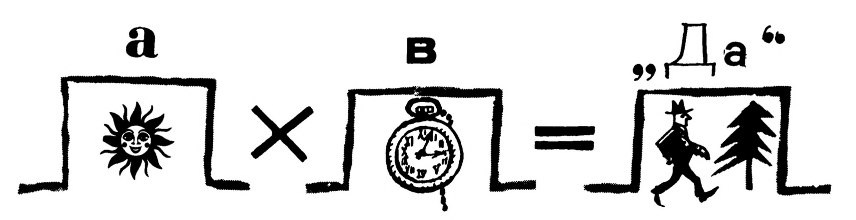
В электронных автоматических схемах триоды обычно решают другие задачи.



Допустим, если деталь установлена правильно (*А*) и подведен резец нужной формы (*В*), станок включится («да»).

В схеме из многих триодов можно предусмотреть много разных условий и при их совпадении получить на последнем триоде общий ответ «да». Так удается с помощью тех же триодов-ключей выработать программы действия для автоматов и вычислительных электронных машин.





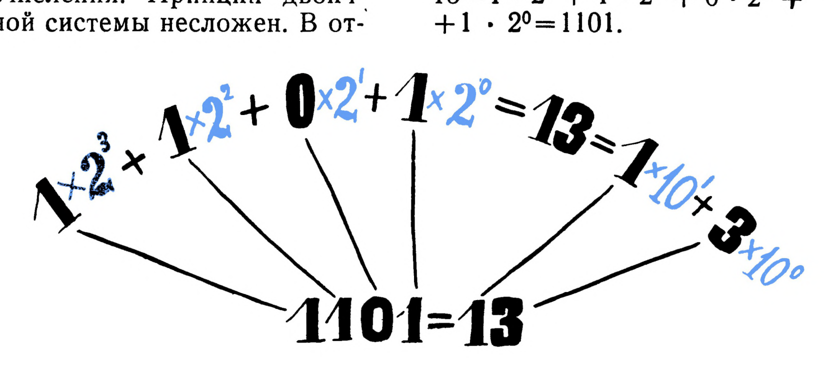
V.3

Когда триод используется для ведения счета, открытое состояние считается единицей, а запертое — нулем. Из единиц и нулей составляют любые числа, применяя двоичную систему счисления. Принцип двоичной системы несложен. В отличие от десятичной, основой которой является число 10, в основе двоичной системы лежит число 2.

Любое число в десятичной системе есть сумма возведенных в различную степень десяток, например: $1307 = 1 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10 + 7 \cdot 10^0$.

А можно это же число представить как сумму возведенных в разные степени двоек: $1307 = 1 \cdot 2^{10} + 0 \cdot 2^9 + 1 \cdot 2^8 + 0 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 10\,100\,011\,011$.

А число 13 выглядит так: $13 = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^0 = 1101$.



Более подробно о принципах двоичного счета и о логических операциях читатель может узнать из книг Н. Кобринского и В. Пекелиса «Быстрее мысли» и Е. Седова «Репортаж с Ничейной земли», вышедших в издательстве «Молодая гвардия» в 1963 году.

V.4



Присвоив двоичные номера всем буквам алфавита, можно превратить любой текст в чередование единиц и нулей.

Триод, отпираясь и запираясь, продекламирует стихи Пушкина или прозу Тургенева на своем «ламповом языке».

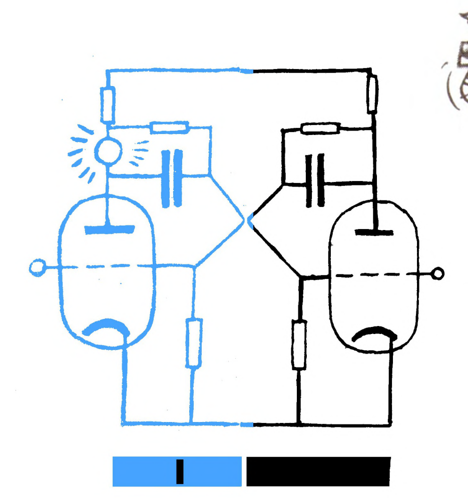
V.5



Очень удобной для двоичного счета оказалась схема из двух триодов, известная под названием триггера (что означает по-русски — защелка).

Сначала триггер использовался локацией, а в последние годы стал применяться в огромных количествах в цепях электронных машин.

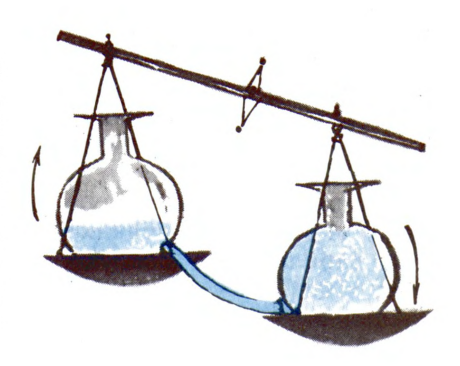
Триггер имеет два состояния. Если левый триод открыт, то правый обязательно заперт. В этом случае зажигается лампочка, включенная в анодную цепь левого триода, что означает цифру «1».



В другом состоянии правый триод открыт, а левый заперт. Лампочка не зажигается («0»).

V.6

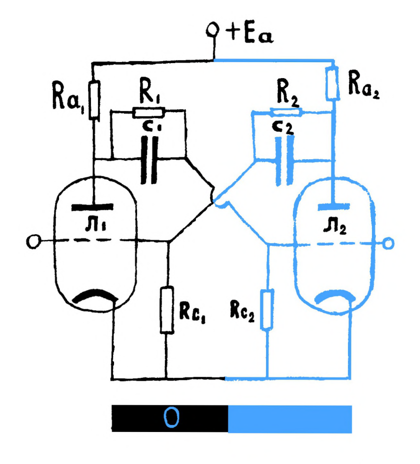
По принципу действия триггер напоминает весы, когда на обеих чашах их установлены сосуды, наполненные очень подвижной жидкостью, соединенные между собой. Толкнув правую чашу весов, мы заставим ее опуститься, и вся имеющаяся жидкость перетечет в правый сосуд.



Положение это будет очень устойчивым, потому что жидкость всей своей тяжестью давит на правую чашу весов. Чтобы вывести нашу систему из этого состояния, нужно теперь толкнуть вниз левую чашу. По инерции она пройдет положение равновесия, и переливающаяся из правого сосуда жидкость начнет заполнять левый. Жидкость будет теперь давить на левую чашу. Весы займут новое положение, и оно тоже будет устойчивым. Чтобы изменить его, нужен новый толчок.

V.7

Нечто подобное происходит и в триггере: сосудами являются электронные лампы, а вместо быстро переливающейся жидкости — еще более быстрый электрический ток. В запертой лампе нет никакого тока — это пустой сосуд.



Пусть вначале заперта левая лампа $Л_1$ — триггер стоит в положении «0». В какой-то момент на сетку $Л_1$ пришел положительный импульс — наши «весы» получили толчок. Пока лампа $Л_1$ была закрыта, ток шел мимо лампы, «околь-

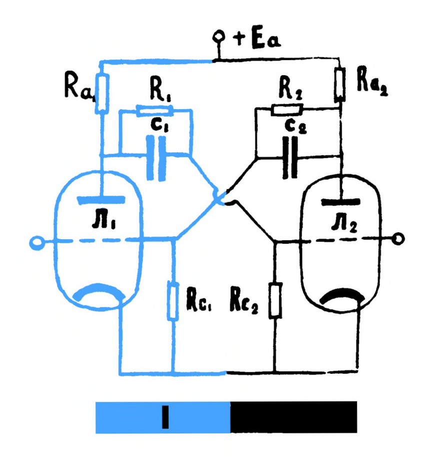
ным путем», через цепочку сопротивлений Ra_1; R_1; Rc_2. Эта цепочка представляет собой делитель. На каждое из трех плеч делителя приходится определенная часть положительного анодного напряжения ($+E_a$).

Импульс отпер левую лампу $Л_1$, которая подключена параллельно нижнему плечу делителя Rc_2. На нижнем плече делителя Rc_2 положительное напряжение стало намного меньше (так как сопротивление отпертой лампы $Л_1$ мало), то есть уменьшилось положительное напряжение между сеткой и катодом лампы $Л_2$. Лампа $Л_2$ начнет запираться. А так как $Л_2$ включена параллельно плечу Rc_1 второго делителя (цепочки Ra_2; R_2; Rc_1), то на этом плече напряжение будет расти. Значит, растет положительный потенциал и на сетке $Л_1$, эта лампа отпирается еще больше.

V.8

Можно подумать, что у ламп существует своеобразная взаимопомощь: обе они помогают друг другу перейти в новое состояние. А в результате левая теперь отопрется, а правая будет закрыта: вся «жидкость» перетекла с правой «чаши» на левую, весы «опрокинулись» и будут ждать в таком состоянии нового толчка. Этому состоянию соответствует цифра «1».

Очевидно, что в данном случае на чашу «весов» действует не вес «электронной жидкости» — ведь вес электронов ничтожен, — а ее электрические заряды.



Двигаясь, электроны создают внутри электронной лампы ток. Импульсы тока рождают импульсы напряжения, напряжение действует на сетку другой половины триггера и опрокидывает «весы».

V.9

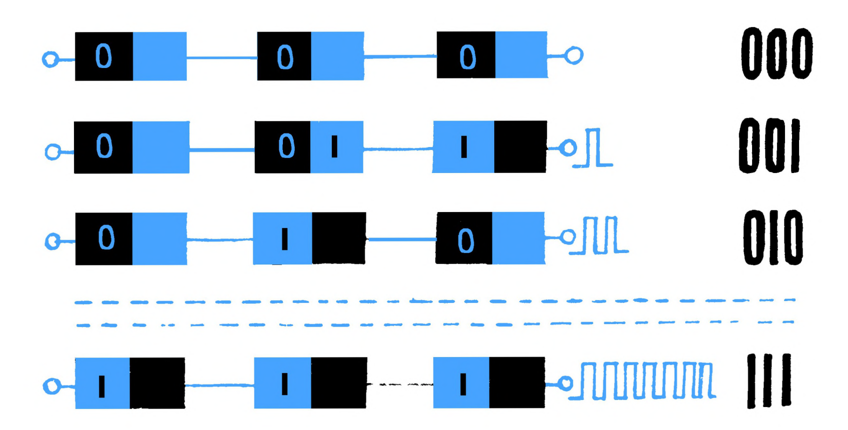
Соединим в цепочку три триггера и заставим каждый из них после того, как «весы» один раз качнутся туда и обратно, толкать следующие «весы». С помощью этой цепочки можно вести счет приходящих импульсов. Первый импульс опрокинет триггер, стоящий в начале цепочки. Второй импульс заставит «весы» качнуться обратно, и при этом импульс с первого триггера опрокинет вторые «весы».

С приходом следующей пары импульсов триггер, стоящий на входе цепочки, снова качнется туда и обратно и передаст еще один импульс триггеру *2*.

Первый триггер будет качаться от каждого импульса, второй триггер — от каждой пары, третий — от четырех. Чтобы качнуть «туда и обратно» последний триггер, нужно подать восемь импульсов, то есть 2^3.

Цепочка из четырех триггеров опрокинется после прихода 16 импульсов (то есть 2^4), пять триггеров — от 32 импульсов (2^5), а n триггеров — от 2^n.

А если надо считать миллионы и миллиарды импульсов, не слишком ли много потребуется триггеров?



V.10

Есть индийская легенда о том, как царь Шерам решил наградить мудреца Сету за изобретенную им шахматную игру.

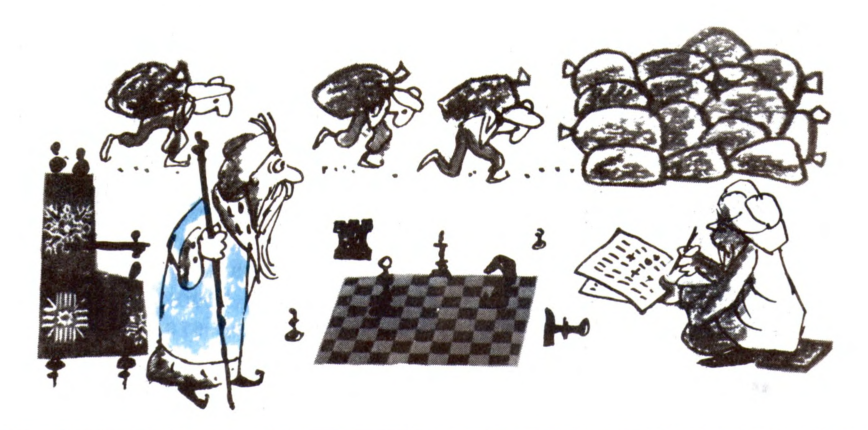
Просьба Сеты показалась царю очень скромной: мудрец пожелал получить

в награду пшеницу, причем попросил, чтобы на каждую клетку клали количество зерен в два раза большее, чем лежит на предыдущей клетке.

Доска содержит 64 клетки. Если 2 зерна положить на первую клетку, на последней должно быть 2^{64} зерен.

Выдать обещанную награду царь так и не смог. Когда подсчитали количество зерен последней клетки, то оказалось, что их должно быть 18 квинтильонов 446 квадрильонов 744 триллиона 73 биллиона 709 миллионов 551 тысяча 616 штук! Нужны два амбара длиной от Земли до Солнца, чтобы вместить это зерно.

Теперь понятно, что для подсчета огромных чисел триггеров потребуется не очень уж много: ведь 64 триггера могут сосчитать как раз 2^{64} импульсов, то есть то же самое фантастическое число.



Кибернетика и электроника

Кто не слышал об «умных» машинах? Сейчас таких людей, пожалуй, и нет. Всем известно, что существуют на свете машины, которые переводят иностранные тексты, управляют сложным процессом, а порой, в порядке «культурного отдыха», играют в шахматы и пишут музыку или стихи.

Кто научил их всему этому? Творцом всех машин, и «неумных» и «умных», является человек. Но теперь и сами машины, а именно высшие автоматы, по ходу работы учиты-

вают собственные ошибки и накапливают опыт, становясь с каждым разом все «умней» и «умней». Того и гляди, машина станет настолько «умной», что сможет учить и тех, кто ее создавал! Удивительные машины. Сырьем для них служат различные сведения, или, как теперь говорят, информация, поступающая из внешнего мира. А готовым продуктом — решения, возникшие в электронных цепях.

Мы восхищаемся ими. Но еще большего восхищения достоин человеческий гений, сумевший их породить. Энгельс назвал человеческий разум высшим цветом природы. А высший цвет электроники — это рождение «думающих» электронных машин.

Но было бы несправедливо приписывать эти заслуги одной электронике. Не случайно все «умные» машины и автоматы относятся к классу *кибернетических* электронных устройств. Кибернетике принадлежат здесь все основные заслуги, так как все «умные» автоматы построены на основе ее методов и идей.

Казалось бы, у электроники роль здесь гораздо более скромная: она послужила лишь базой, на которой идеи, рожденные кибернетикой, смогли претвориться в жизнь. И все же не стоит слишком поспешно отодвигать на второй план электронику: если бы не было почвы, не было бы и идей. И если электроника существовала до кибернетики, то кибернетики без электроники представить себе нельзя. Кибернетика предложила новые остроумные схемы. Но какие бы схемы она ни создала, все равно без помощи быстрого электрона совершать сотни тысяч действий над числами машина бы никогда не смогла.

Впрочем, надо ли между двумя новейшими направлениями современной науки и техники — кибернетикой и электроникой — проводить какой-то рубеж? Никаких разногласий и споров между ними не возникало, а существует лишь тесное творческое содружество, давшее миру удивительные плоды.

Однако то, что сейчас будет сказано, вероятно, многим покажется неправдоподобным: электроника не приложила ни малейших усилий для создания первых электронных машин. У нее все было готово заранее: и короткие импульсы, применяемые в схемах локаторов, и магнитные ленты для «запоминания» данных расчета, и известные еще со времен первых триодов управляемые лампы-ключи. И надо заметить, что все это очень простые средства на фоне всего, что к этому времени успела создать электроника.

Что для нее ключевые схемы, если она уже создала

магнетроны, клистроны, великое множество высокочастотных приборов, импульсных генераторов и разнообразнейших схем! И как это ни удивительно, факт остается фактом — роды локации и телевидения электроника переживала гораздо мучительней, чем появление первых электронных вычислительных машин и приборов, знаменующих собой новый этап электроники и ее «высший цвет»,

Все для нее обошлось очень просто: взяла кибернетика готовые схемы и электронные лампы и стала соединять их по-своему. Возникли схемы кибернетические. От прежних схем электроники они отличались принципиально: они могли «рассуждать», вычислять, обобщать, делать выводы. Они стали как бы «мыслить» самостоятельно, в то время как прежние схемы могли жить только «чужим умом». «Мышление» их имеет особую форму: любой сложный расчет или логическое рассуждение они расчленяют на два простых элемента: «да» или «нет»; «0» или «1». Никаких хитрых ламп для этого вовсе не нужно. Так работает самый обычный триод. Если он заперт, тока в его анодной нагрузке нет — триод дает ответ «нет» или число «0». Если отпереть его импульсом, приходящим на сетку, триод дает ответ «да» или число «1». А из двух этих ответов можно составить любую программу, самые сложные вычисления и даже любую мысль.

Помните детские игры, в которых один из участников ищет спрятанные предметы, а все остальные говорят ему «жарко», «холодно»? В принципе «жарко» и «холодно» — это те же сигналы: «0» или «1», «да» или «нет». По этим сигналам один из играющих находит ловко спрятанные предметы, получив в зашифрованном виде инструкцию: «Предмет, который ты ищешь, находится в том углу комнаты, в шкафу, стоящем напротив дивана, в третьем ящике снизу, в левом ряду».

Подобное руководство можно дать и электронной схеме в виде последовательности импульсов, поданных в цепь электронных машин.

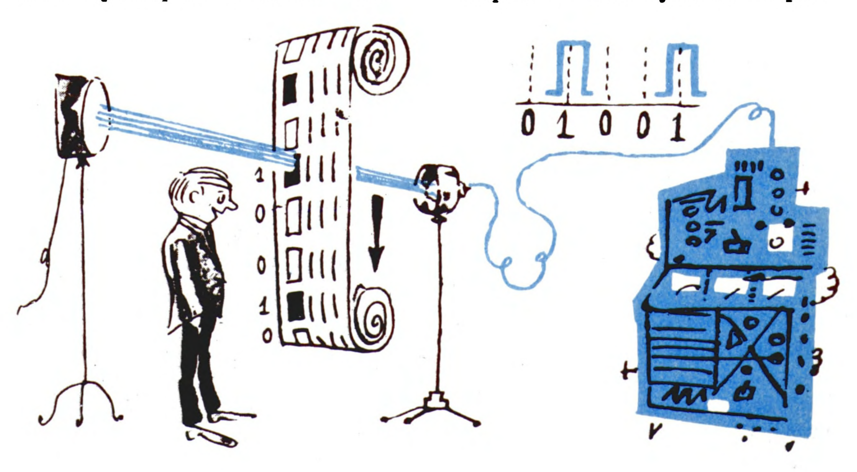


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

V. II

Каждый шаг обработки данных в кибернетической электронной машине неизбежно связан с применением тех или иных электронных приборов и схем. Самый первый шаг — это введение в машину тех данных, которые ей предстоит обработать.

Обычно перед вводом в машину все данные заносят на перфокарты. Перфокарта — это кусочек карто-



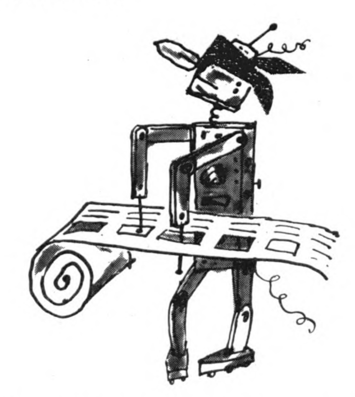
на, на котором через определенные интервалы нанесены знаки двоичного кода, причем отверстию соответствует «1», а отсутствию отверстия — «0».

Чтобы ввести эти знаки в машину, карта с помощью простого механизма равномерно протаскивается мимо источника света. Через отверстия свет попадает на фотоэлемент, и за счет фотоэффекта * под действием света в фотоэлементе возникает ток. Ток появляется в тот момент, когда между источником света и фотоэлементом проходит отверстие перфокарты. Значит, импульс возникнет там, где стоит знак «1», а отсутствию импульса соответствует знак «0».

V.12

Для многих машин перфокарта — это единственный мостик, связывающий их с внешним миром. Она заменяет им глаза и уши, органы осязания, обоняния, вкуса. Ведь, кроме цифр, нанесенных на перфокарту, в виде отверстий и пропусков, такая машина не способна воспринять ничего. А это бывает иногда неудобно: чтобы машина работала, надо, чтобы кто-то другой осязал, видел, слышал и сообщал машине о своих наблюдениях с помощью перфокарт.

А нельзя ли сделать такую машину, которая могла



бы самостоятельно вести наблюдения?

Для восприятия внешнего мира природа вооружила человека пятью органами чувств. А как быть с электронной машиной? Едва ли можно предположить, что электроны способны видеть, слышать и осязать.

V.13

Действительно, один электрон не обладает зрением или слухом. Зато коллектив их может быть наделен не только слухом и зрением, но и способностью

* Явления фотоэффекта рассматривались в главе «Электроны, волны, поля» (раздел «Где взять сто солнц?»).



ощущать температуру, давление, а со временем они станут, очевидно, различать и запахи и вкус.

Микрофон заменяет машине уши: он превращает внешние звуки в электрический ток. Электронная трубка может служить машине глазами: она превращает изображение в соответствующий сигнал. Обработав этот сигнал в специальных схемах, машина может отличить собаку от кошки, читать написанный разным почерком текст.

Снабдив машину слухом и зрением, можно заставить ее печатать речь докладчика или статью из журнала сразу на нескольких языках.

Чтобы заставить машину работать «на слух», надо создать сложные схемы, способные подбирать каждому звуку, независимо от того, кто его произносит, соответствующее сочетание букв. А можно сделать наоборот: по сочетанию букв вырабатывать звуковые сигналы. И тогда машина станет говорящей, так как она уже способна произносить вслух то, что написано в тексте, то есть читать прямо «с листа».

V.14

А теперь познакомимся с органами «осязания». Их называют *датчиками*. Датчики помогают машине воспринимать — «осязать» — тепло, давление, концентрацию разных растворов, воздействие электрических сигналов — короче, все то, что способен ощущать живой человек. Датчики превращают все эти воздействия в электрические сигналы.

Кстати сказать, на изменение внешних факторов (концентрации, температуры, давления) машина реагирует значительно чутче, чем человек. Чтобы повысить чувствительность восприятия, сигнал на выходе датчиков усиливают с по-

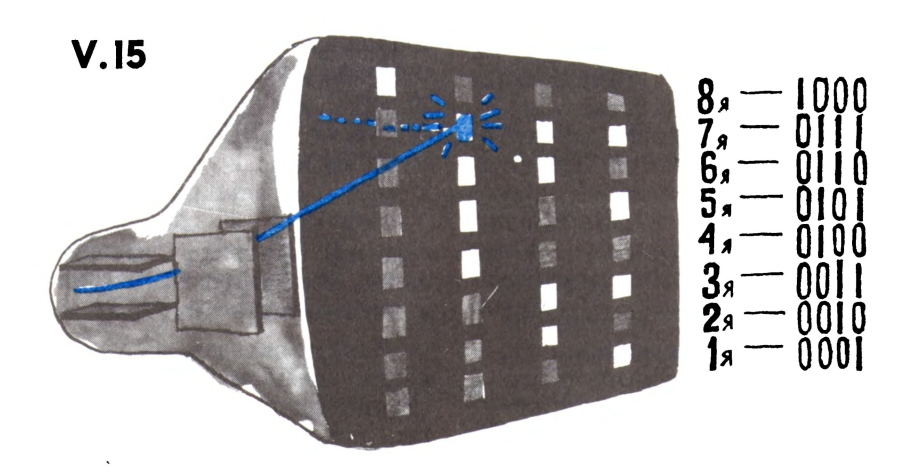


мощью электронных приборов.

Сами датчики обычно устроены просто. Чтобы «почувствовать» температуру какого-либо тела, достаточно привести в соприкосновение с ним *термосопротивление*. Величина сопротивления его зависит от температуры. С ростом ее сопротивление изменяется и в цепи изменяется ток. Так работает датчик температуры.

Датчик давления может представлять собой конденсатор, одной обкладкой которого служит мембрана. При увеличении давления мембрана прогибается, зазор между обкладками сужается, емкость увеличивается, и в цепи изменяется ток.

Микрофон и электронная трубка — это тоже своего рода датчики. Микрофон является датчиком звука, трубка — датчиком изображения.



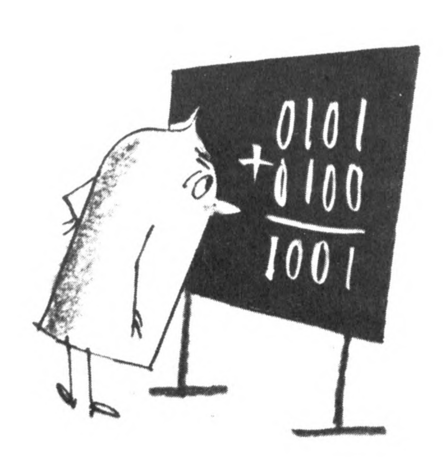
С помощью датчиков машина ведет наблюдения. Но этого мало. Она должна еще обрабатывать результаты своих наблюдений, сопоставлять их друг с дру-

гом и, принимая решения, либо давать людям рецепты и рекомендации, либо самостоятельно влиять на процесс, за которым ей поручено наблюдать. Другими словами, получив сигналы со многих датчиков, машина должна проделать расчет.

Расчеты обычно ведутся в двоичной системе. Значит, все данные, приходящие с датчиков в виде непрерывно меняющихся напряжений, надо перевести на двоичный код. Задача, казалось бы, новая, однако решить ее помогла знакомая нам электронная трубка, которая пригодилась и тут.

На экране трубки установлена решетка, и каждая ее строка, или «ступенька» (уровень), занумерована в двоичной системе: отверстие — 1, пропуск — 0. Когда напряжение с датчика подается на вертикально-отклоняющие пластины, то луч поднимается. Затем заставляют его бежать по строке, а фотоэлемент вырабатывает последовательность импульсов. Например, на рисунке луч бежит по седьмой «ступеньке» и вырабатывает двоичное число семь (0111). Если растет напряжение датчика, растет и номер «ступеньки» (луч побежит по более высокой строке).

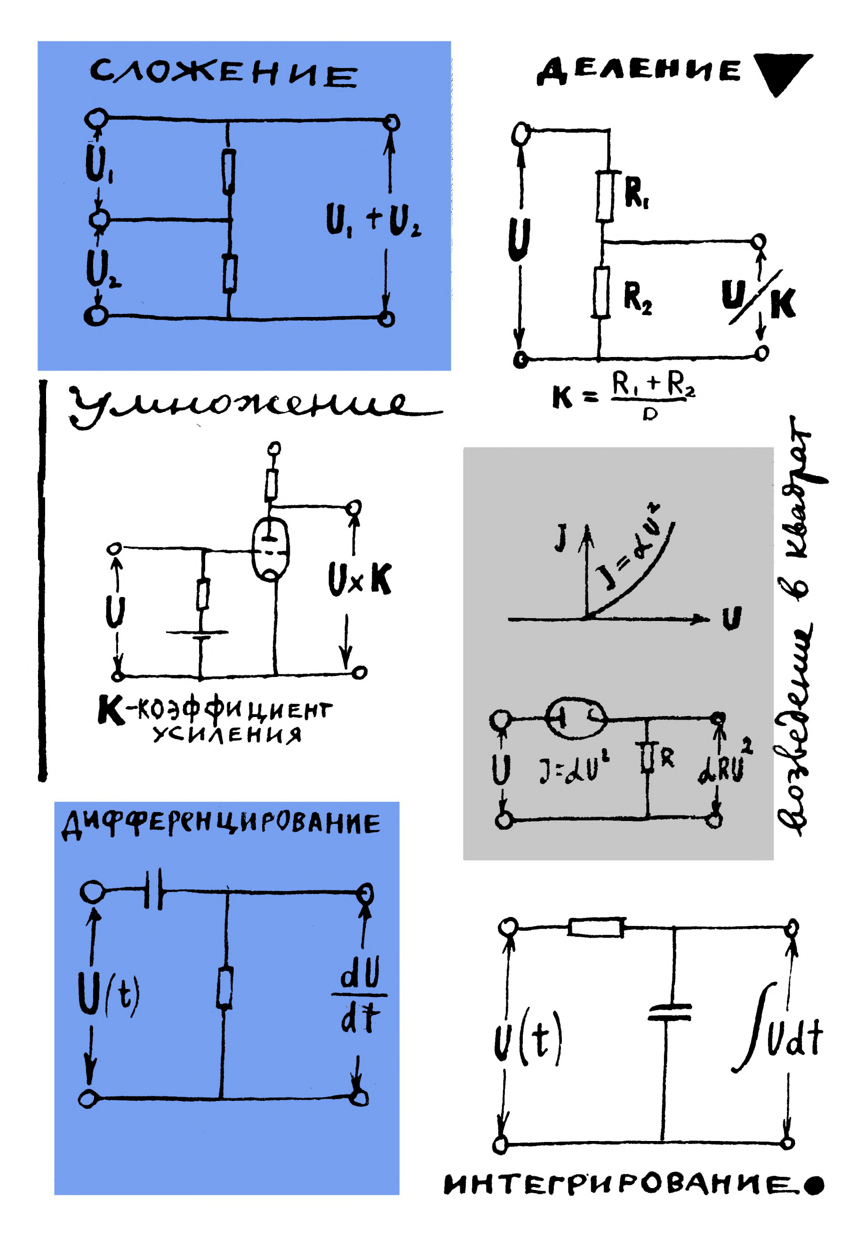
V.16



С помощью двоичной системы счисления удается свести все числа и все операции с числами к сочетаниям единиц и нулей. Триоды-ключи могут складывать, умножать и делить двоичные числа согласно программам, которые тоже представляют собой последовательность единиц и нулей.

Таков принцип работы электронных вычислительных машин *дискретного счета*. Дискретность (прерывистость) заключается в том, что все величины нужно делить на «ступеньки», как показано на рисунке V. 15.

V.17


СЛОЖЕНИЕ
U₁
U₂
U₁ + U₂
ДЕЛЕНИЕ
U
R₁
R₂
U/K
K = (R₁ + R₂)/D
Умножение
U
U×K
K-коэффициент усиления
J
J = αU²
U
возведение в квадрат
J = αU²
R
αRU²
ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ
U(t)
dU/dt
U(t)
∫Udt
ИНТЕГРИРОВАНИЕ

А есть машины непрерывного действия. Они обрабатывают сигналы, приходящие с датчиков, не переводя их на двоичный код.

Диоды, триоды, емкости, сопротивления, включенные в определенной последовательности, позволяют складывать, умножать, делить электрическое напряжение. Даже такие сложные математические операции, как дифференцирование и интегрирование, производят простые ячейки *RC*.

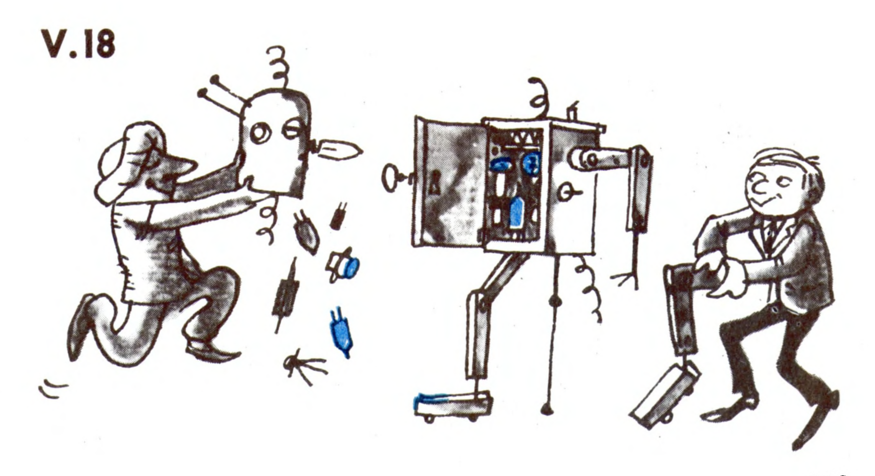
Машина действует по уравнениям, а уравнение отображает какой-то процесс. Например, уравнение тока в контуре совпадает с уравнением движения маятника или струны. Значит, движением электронов в колебательном контуре моделируется процесс механических колебаний (см. III.4).



Движением электронов можно создать модели более сложных процессов: полета самолета или снаряда, движения жидкости или газа, химической реакции и т. д.

Поэтому машины непрерывного действия относятся к классу так называемых *моделирующих машин.*

V.18



Мы еще раз убеждаемся в том, что электроника была хорошо подготовлена к созданию «умных» машин: многие задачи теперь удается решить с помощью давно разработанных ею средств. Машина может быть удивительно «умной»: переводить текст с одного языка на другой, писать стихи, играть в шахматы, рассчитывать траектории сложных движений, управлять производством, обучаться и накапливать опыт и даже узнавать вас в лицо. Но разберите любую машину «по косточкам», и вы убедитесь, что среди ее элементов нет ничего необычного; те же диоды, триоды, электронные трубки, магниты, контакты, реле. И лишь при совместном действии этих простых элементов получаются результаты, о которых всего лишь лет 20—30 назад не посмел бы мечтать даже самый пылкий фантаст.

Всемирный потоп и электронный ковчег

Было время, когда все добытые человечеством знания умещались на нескольких глыбах гранита. Затем на смену клинописи на камнях пришли свитки папируса с записью, сделанной от руки.

Параллельно развивались и средства ведения счета:







узелки на веревках, зарубки на палках, камешки или костяшки, перемещающиеся по стержням и желобам.

В России с древних времен применялись приспособления для «дощаного счета» — прообраз бухгалтерских счетов. По веревкам передвигались косточки. «А изряднее, — писалось в одной из первых инструкций, — вместо вервей проволока медная или железная». Премудрость этих приспособлений была, как видите, невелика.

Но вот поток информации впервые прорвал запруду — появился печатный станок. Ручейки информации стали сливаться в широкие реки. Развивающаяся наука впервые выдвинула задачу автоматической обработки данных.

Еще в XVII веке выдающийся философ и математик Лейбниц пытался решить эту задачу с помощью имевшихся в его распоряжении механических средств. Машина вышла громоздкой и сложной. Ей не суждено было совершить революции в вычислительной технике, так же как и машине, созданной прежде Блэзом Паскалем, и появившимся после Лейбница машинам русского академика Пафнутия Львовича Чебышева и англичанина Чарльза Бабеджа. И все по одной и той же причине.

Процесс вычислений сам по себе достаточно сложен. Чтобы выиграть время, автомат, производящий расчеты, должен обладать быстродействием современных электронных машин. А достичь этого можно лишь с помощью электронных приборов, в которых главной подвижной деталью является обладающий неощутимой массой и ничтожной инерцией, юркий, подвижный, маленький электрон.



Электронная машина в течение каждой секунды успевает проделать десятки и сотни тысяч действий над многозначными числами, а за секунду она производит такие расчеты, на которые бюро в составе

100 вычислителей потратило бы несколько дней.

Разве может достичь таких результатов механика с ее трущимися шестернями и неповоротливыми рычагами, каждое переключение которых должно занимать по крайней мере доли секунд!



Настало время, когда дальнейший прогресс науки и техники стал немыслим без автоматизации счета и без больших скоростей вычислений.



Печать, телефон, радио со всех концов света несут сообщения о достижениях века. Гигантских размеров достиг размах исследовательских работ. Тысячи институтов во всех странах решают одни и те же проблемы. Итоги подводятся ежемесячно на страницах 50 тысяч научных журналов, издаваемых на 100 языках.



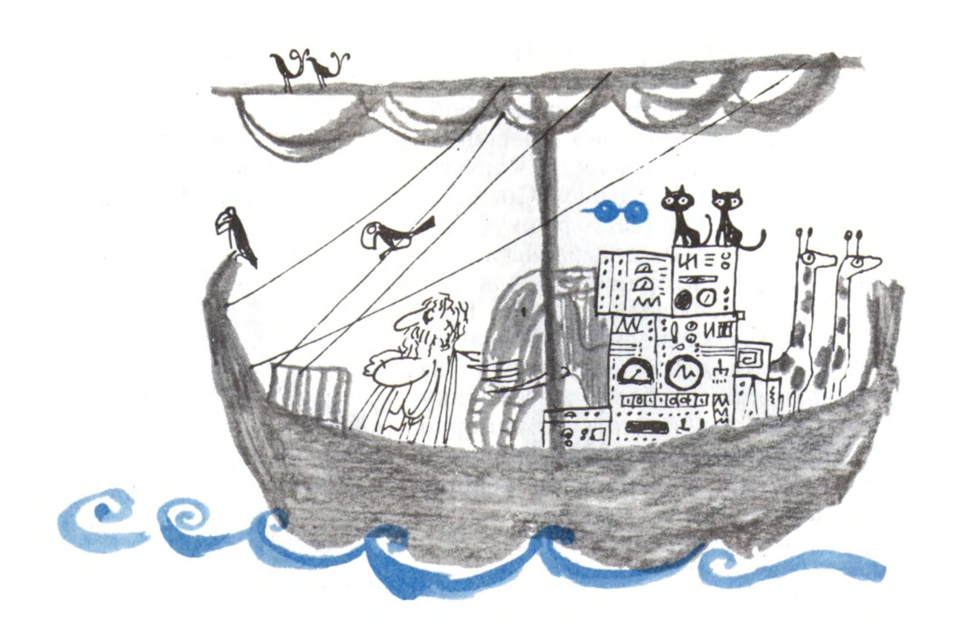
Достижение одного человека очень быстро становится достижением человечества. Все научные данные проверяются в сотнях лабораторий и множатся в тысячи раз.

Технические объекты совмещают в себе сложный комплекс механики, энергети-

ки, химии и электроники. Ни один инженер не в состоянии уследить за всеми новинками техники, необходимыми для создания совершенных и современных машин. Расчеты становятся все сложнее. Сотни и тысячи уравнений надо решить для прогнозов погоды, для расчета космических траекторий или для исследования белковых веществ. Время расчетов становится фантастически громадным. Систему из 100 уравнений одному математику пришлось бы решать примерно 4 года. Систему из 1000 уравнений 60 поколений математиков решали бы 4 тысячи лет.







А сколько вообще уравнений надо решать человечеству?

Наши привычные меры слишком обыденны, чтобы представить себе то огромное количество сведений, которое требуется обрабатывать при решении современных научных проблем. Взять хотя бы вопрос изучения полимеров и белковых веществ. Молекулы их состоят из длинных цепочек атомов, а любая перестановка звеньев в этой цепочке дает новое вещество. Если бы мы могли взять из всех существующих в мире типов белковых цепочек по одному образцу молекул и свить их них веревку, то свет, излученный в начале этой веревки, достиг бы ее конца через 75 лет! А ведь свет пробегает 300 тысяч километров в секунду!

Океан знаний безбрежен. Все добытые сведения надо обрабатывать, сопоставлять, обобщать, пополнять, классифицировать — без этого дальше идти нельзя. Может быть, следует остановиться?

Нет, рожденный природой разум никогда не даст человеку покоя, он будет всегда добывать новые знания, постигать все новые тайны вселенной, изучать структуру Метагалактики и строение пи-мезонов, идти одновременно и вширь и вглубь.

Все больше потоков течет в океан человеческого познания. Океан информации становится шире и шире, человечеству угрожает всемирный потоп.

Вот почему люди создают машины, которые могут обрабатывать все добытые сведения; машины, которые способны сами добывать эти сведения, сопоставлять их, обобщать, классифицировать и сообщать результат.

Сила разума беспредельна. Человек смело плывет по рожденному им же самим океану, построив, подобно легендарному Ною, спасительный электронный ковчег.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

V.19

Всем известно, что способностью что-нибудь помнить обладают люди и отчасти животные. Но с появлением кибернетики стало ясно, что некоторым подобием памяти может быть наделен и неодушевленный предмет. Глыба гранита до сих пор «помнит» события, запечатленные в клинописи чьей-то рукой. Точно так же «помнит» события книга; палка с зарубками помнит число лошадей или баранов. Все это системы *длительной памяти.*

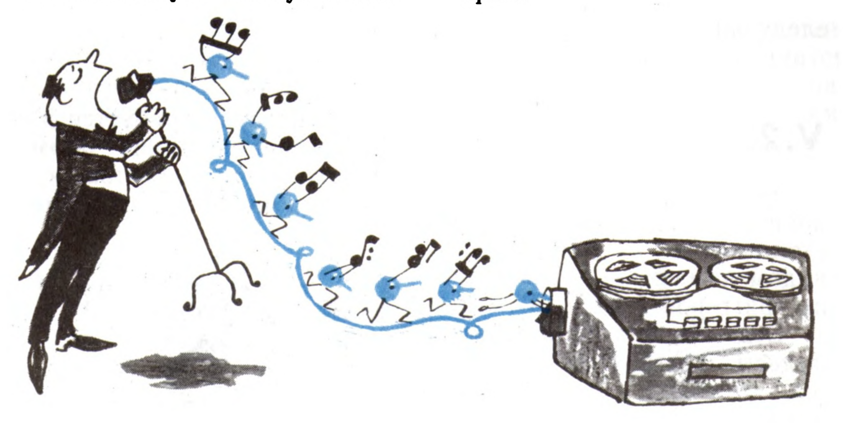
А счеты помнят числа недолго — до тех пор, пока не закончен расчет. В нашей памяти тоже есть разные «полочки». На одних хранятся события многолетней давности, а на других — то, что понадобится лишь сегодня и завтра: начало киносеанса, номер дома, вагона, купе. Иногда, не надеясь на память, мы прибегаем к «памяти» тех же неодушевленных предметов, например к узелкам на носовом платке.

У электронных вычислительных машин память тоже бывает двоякой. Для промежуточных вычислений есть короткая *оперативная память.* Окончательные данные хранятся в системе длительной памяти.

Что же собой представляет «память» машин?

V.20

Оказывается, и «память» была разработана электроникой задолго до появления электронных вычислительных машин. Скажем, приборы для записи сигналов на магнитную ленту. Если нам хочется иметь на память любимую арию, мы используем магнитофон. Он запоминает мелодию, голос актера вместе с аккомпанементом гораздо точнее, чем мы сами. Да притом есть уверенность, что лента долго не забудет записанной арии.



V.21

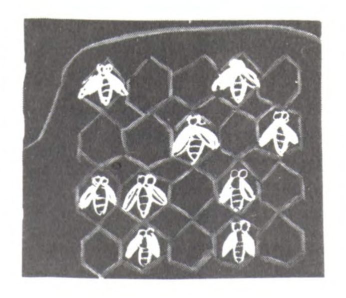
У электронной трубки тоже есть память: ведь очертания импульса, прорисованного лучом при первом пробеге, сохраняются какое-то время, а затем пропадают. Потом, при новом пробеге луча, след возобновляется *. Свойство трубки сохранять изображение называют *послесвечением*. Послесвечение длится секунду или доли секунды. Поскольку луч движется намного быстрее, чем лента магнитофона, большое количество знаков двоичного кода трубка может запомнить гораздо быстрее, чем магнитофон. Это и есть короткая (оперативная) память: в нее можно быстро вводить большое количество данных, зато на короткий срок.

Вместо простого экрана в запоминающих трубках ставят решетку из емкостных ячеек, некоторое подобие пчелиных сотов. Пробегая каждую строчку экрана,

---

* См. в главе I разделы «След невидимок» и «О пиле, луче и ключе».

луч передает емкостным ячейкам какое-нибудь число. В каждой ячейке хранится один знак двоичного кода — «1» или «0». Скорость луча рассчитана так, что к следующей ячейке он подходит как раз в тот момент, когда на модулирующий электрод трубки подан следующий знак.



10010
00101
11010
01010

V.22

Знакомясь со схемами двоичного счета, мы с вами столкнулись с еще одним видом памяти — с цепочкой из триггеров (см. V. 9).

Ведь после того как импульсы опрокинули триггеры, цепочка помнит их число. Но сохранять это число в памяти счетной цепочки очень невыгодно: для этого требуется множество триггеров. Поэтому числа, полученные в ходе работы триггеров, передаются потом на электронные трубки, в ту самую короткую память, которая требуется для запоминания лишь промежуточных результатов, вроде «два пишем, а три в уме».



V.23

Долго храниться в ячейках запоминающей трубки числа не могут. Если расчет закончен, надо передать результат системе длительной памяти. Пробежав по ячейкам, луч превратит их заряды в импульсы тока, ток будет действовать на головку магнитозаписывающей установки, магнитное поле головки оставит на ленте следы: запишет информацию. Когда эта информация по-

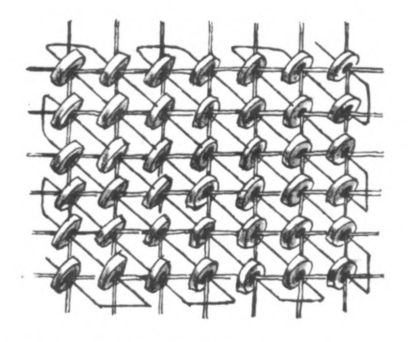
надобится, с помощью второй головки можно магнитную запись вновь превратить в импульсы тока.

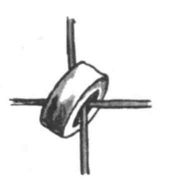
Однако есть у такой памяти одно неудобство: если нужное число записано в конце ленты, то для извлечения его из памяти приходится перематывать всю ленту на другой барабан. Подобные поиски данных в системе длительной памяти требуют много времени, поэтому магнитная запись — это нечто вроде библиотечного фонда: здесь хранится то, что требуется не так часто, зато служит продолжительный срок.





V.24

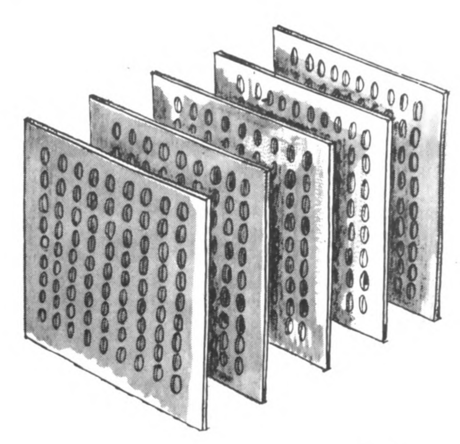




Широкое распространение получили блоки ферритовой памяти. В отличие от трубки или магнитофонной ленты эта память была разработана специально для электронных вычислительных машин.

Феррит есть смесь окисла железа с окислами других металлов. Материал этот обладает хорошими магнитными свойствами.

Ферритовые колечки собирают в специальную ре-



шетку. Если на вертикальную и горизонтальную шины (провода) одновременно придут сигналы, колечко, находящееся на пересечении шин, изменит свое магнитное состояние — знак «0» сменится знаком «1».

Для считывания чисел есть третья шина — провод, идущий по диагонали решетки.

В последнее время вместо набора колец применяют ферритовые пластинки с отверстиями. Расстояния между отверстиями выбраны так, чтобы магнитное поле вокруг каждого из отверстий не влияло на остальные. Благодаря такой конструкции памяти ее размеры удалось уменьшить в несколько раз.


V.25

Стремясь сделать память как можно компактнее, специалисты пытаются «обучать» двоичному счету даже атомы разных веществ. Возбужденному атому соответствует знак «1», невозбужденному — «0».

Что нужно от электроники?

По ходу знакомства с элементами «умных» машин мы много раз приходили к выводу: все средства для создания таких машин у электроники есть. Больше того, они были готовы заранее, потому что локация уже давно применяет и трубки, и импульсы, и диоды, и триоды, и триггеры.

Но у читателя может сложиться ложное впечатление, будто, достигнув «высшего цвета», электроника может почить на лаврах. Все свои элементы она предоставила в распоряжение кибернетике, и пусть, дескать, теперь кибернетика проявляет заботу о том, как их лучше использовать, какие строить программы, как соединять элементы для выполнения этих программ.

В действительности же дела обстоят вовсе не так. Появление электронных вычислительных машин (ЭВМ) послужило таким могучим толчком для развития электроники, что все предыдущие этапы ее развития теперь кажутся периодом раннего детства.

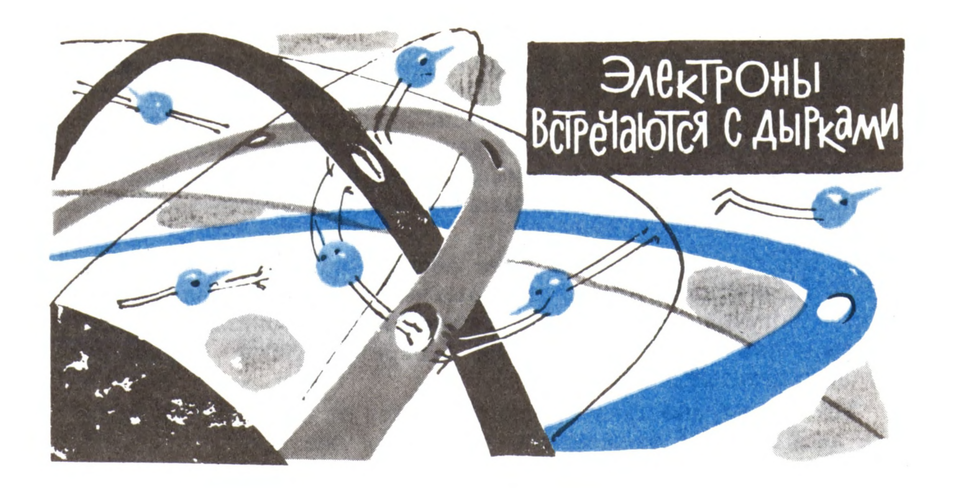
Но что же, собственно, еще требуется от электроники, если все необходимые элементы у нее давно уже есть?

Есть-то есть, да элемент элементу рознь. Можно построить машину и на обычных лампах, да только на самом деле вся современная счетная техника использует не вакуумные лампы, а полупроводники. Лампы оказались слишком громоздкими, они потребляют много энергии, часто выходят из строя. Пока электроника создавала бытовые и специальные радиоприемники, передатчики и измерительные приборы, в которых количество ламп исчислялось единицами или десятками, с недостатками вакуумных ламп еще можно было мириться. Но когда возникли машины, в схемах которых используются сотни тысяч диодов и триодов, недостатки их стали тормозом в развитии ЭВМ.

Если каждая из нескольких тысяч ламп счетной машины может работать сотни часов, то вся машина будет выходить из строя из-за отказа одной какой-нибудь лампы по нескольку раз в день. В итоге она будет большую часть своей жизни находиться в ремонте и ни один сложный расчет не доведет до конца. Правда, можно повысить надежность работы, если к каждому блоку приставить дублера и сделать так, как поступают в солидном театре: заболел основной исполнитель — роль играет дублер. Да только и это не выход: если одна машина на лампах занимает несколько комнат, то сколько же потребуется площади в том случае, если ввести в нее еще такое же количество дублирующих ламп?

А проблема потребляемой мощности? Ведь для питания одной подобной машины потребуется электростанция, которая могла бы питать электроэнергией целые города!

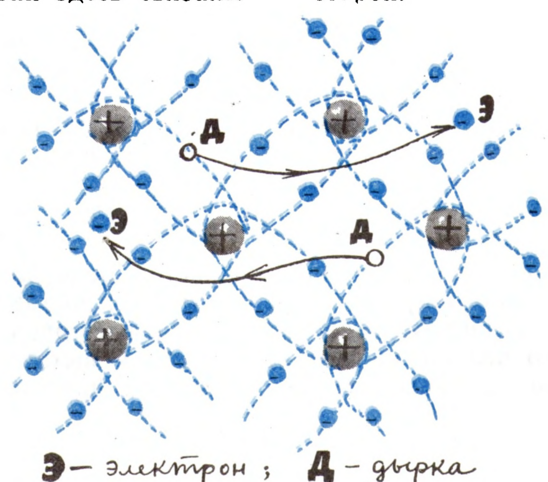
Из этого положения есть единственный выход: электронные машины должны быть построены на полупроводниках.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

V.26

Мы уже много раз говорили о том, что внутри металлов есть свободные электроны. А в изоляторах и в полупроводниковых кристаллах при низких температурах таких электронов нет. Все они здесь связаны с атомами. Например, в кристаллах германия внешнюю оболочку каждого атома образуют 4 связанных электрона. В то же время на каждый из электронов действуют силы соседних атомов. Четыре соседних атома «сковали» свободу каждого электрона с четырех разных сторон.



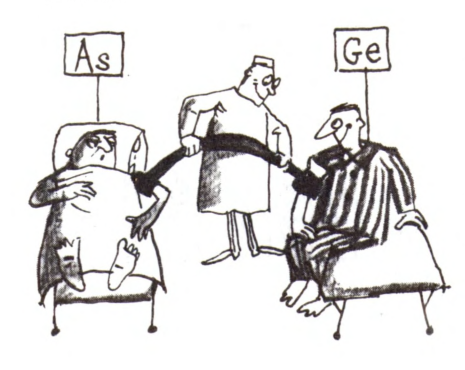
V.27

Но вот в эту структуру проник чужеродный атом примеси, имеющий на наружной оболочке не 4 электрона, а 5. Чужеродный атом расположился в узле решетки кристалла, причем четырем его электронам сразу нашлось место в структуре, изображенной на рисунке V.26. А пятый электрон оказался здесь не у дел. Примесь, атомы которой имеют вот такие



«лишние» электроны, называют *донорной* примесью. Для германия или кремния донорной примесью могут служить мышьяк и сурьма.

V.28



«Вливание крови», полученной от многочисленных атомов-доноров, дают кристаллам германия или кремния свободные электроны. При подаче внешнего напряжения «кровь» начнет циркулировать по кристаллу — в нем будет течь электрический ток.

V.29

В качестве примеси можно использовать индий, у которого на внешней оболочке атомов имеются не 5, а 3 электрона.

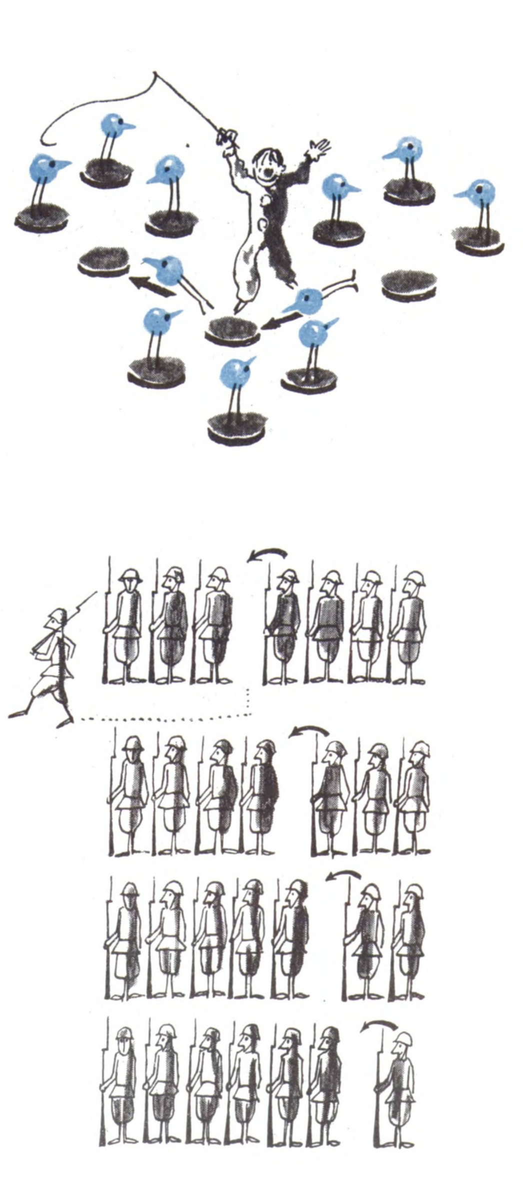
Всем трем электронам индия найдется место в структуре кристалла, но одного электрона будет недоставать.

Это «пустое место» специалисты назвали *дыркой.*

Примесь, создающую дырки в структуре кристалла, называют *акцепторной.*

V.30

Там, где возникла дырка, заряд ядра атома не будет уравновешен, и такой атом окажется с лишней порцией положительного заряда. К положительно заряженному атому со всех сторон потянутся электроны. Ближайший из них займет вакантное место. В данном атоме дырка исчезнет. Зато возникнет дырка в том атоме, из которого только что перебежал электрон.



С новой дыркой произойдет то же самое, что и с предыдущей: место ушедшего электрона вскоре займет другой. Теперь дырка переместится в следующий третий атом, а из соседнего четвертого атома вновь придет электрон. Электроны поочередно станут занимать вакантное место, а само это место будет двигаться им навстречу.

V.31

То же самое происходит в том случае, когда один из правофланговых солдат покинет шеренгу, а остальные

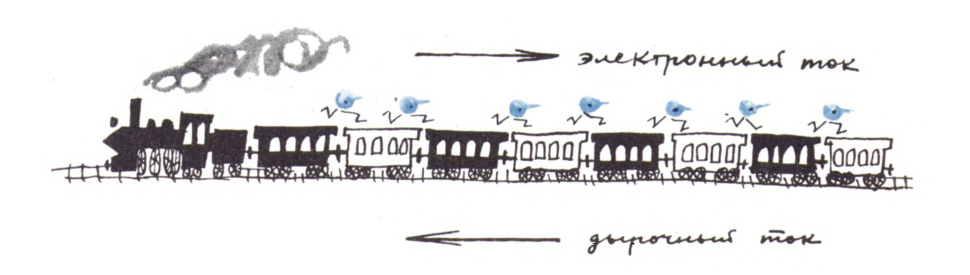
по команде «сомкнись!» станут восстанавливать сомкнутый строй. Солдаты поочередно делают шаг вправо, а пустое место движется к левому флангу.

Таким же образом в кристалле перемещаются дырки.

V.32

Сама дырка не содержит заряда. Но в том месте, где она образуется, заряд атома неуравновешен, так как здесь отсутствует один электрон. Значит, там, где есть дырка, присутствует порция положительного заряда. Если дырки перемещаются, то вместе с ними, как тени, перемещаются и положительные заряды. Так возникает своеобразный *дырочный ток.*

Поле, возникающее в кристалле под действием приложенного к нему напряжения, регулирует это движение: электроны устремляются к положительному электроду, заполняя дырки, встречающиеся по пути. Дырки будут перемещаться навстречу, к отрицательному электроду.



V.33

Говорят, что кристалл, снабженный с помощью донорных примесей избыточными электронами, обладает *n-проводимостью; n* в данном случае означает, что проводимость обусловлена отрицательными зарядами. Отрицательные — негативные, а по-английски — negative.

При наличии дырок возникает *р-проводимость; р* — положительная, позитивная (по-английски — positive).



Ни то ни се

Стоит ли говорить здесь о том, что в целом ряде электронных приборов вместо ламп теперь применяются полупроводники? Едва ли для кого-нибудь это является откровением. Об этом можно услышать всюду. Вы встречаете в поездах, в парках, на улицах молодых людей с походным приемником, ремешок которого с подчеркнуто щеголеватой небрежностью перекинут через плечо. В обиходе такой приемник теперь называют транзистором, хотя транзистором, по сути дела, является не сам приемник, а те приборы, которые используют в нем вместо радиоламп.

Все это вам, очевидно, известно. Но почему, в силу каких своих качеств такое широкое применение нашли полупроводники? И почему именно «полу»?

С тех пор как техника занялась электричеством, она применяла материалы двух категорий: изоляторы и проводники. Проводники очень нужны для передачи тока: с этой целью из материалов, обладающих малым сопротивлением току (медь, алюминий, серебро), изготовляют электрические провода. А чтобы провода не замыкались и ток шел в одном направлении, каждый провод окружают материалом, не пропускающим ток. Вот почему изоляторы тоже находят себе

применение с тех пор, как люди используют электрический ток.

Провод делают из металла. Помимо металлов, проводниками являются газы и растворы солей (см. I.12, I.13).

Изоляторы — это фарфор, керамика, стекло, резина. Воздух тоже является изолятором, потому и приходится избавляться от воздуха для того, чтобы в стеклянном баллоне радиолампы мог течь электрический ток (см. I.14).



Были известны и такие материалы, которые по своим свойствам не подходили ни к той, ни к другой категории. Их назвали полупроводниками, хотя с таким же успехом могли назвать и полуизоляторами. Эти вещества проводят ток несколько лучше, чем изоляторы, и в то же время значительно хуже проводников; короче, это и плохие проводники и плохие изоляторы. Такими свойствами обладают чистые элементы: кремний, селен, германий, теллур. А есть и химические соединения, обладающие теми же свойствами, например окислы некоторых металлов, соединения с серой (сульфиды) или с селеном (селениды). Некоторые сплавы металлов тоже ведут себя как полупроводники.

Так же, как в изоляторах, в полупроводниках все электроны прочно связаны с атомами (см. V.26). При нагревании полупроводниковых кристаллов некоторым электронам все же удается выйти из-под влияния атомов. Поскольку таких электронов немного, ток, возникающий в нагретом полупроводниковом кристалле, будет весьма невелик.

Все рассказанное было давно известно. Свойства германия предсказал еще Менделеев, который, кстати, его и открыл. Он называл его экасилицием. А силицием тогда называли кремний. Этим названием Менделеев хотел подчеркнуть их родство.

Немецкий ученый Винклер подробно исследовал свойства германия и в честь своей родины дал ему имя, которое и сохранилось до наших дней.

Разумеется, химикам необходимо было исследовать и германий и кремний. Но ни электротехника, ни электроника долгое время не проявляли к ним интереса. И это естествен-



но: какой им прок от материала, который не может служить ни надежным изолятором тока, ни хорошим проводником? Так, нечто среднее, «полу-полу» или, как говорится в народе, «ни богу свечка, ни черту кочерга».

Секрет магической точки

Кремнием и германием электроника заинтересовалась значительно позже. А вначале нашли себе применение некоторые окислы, в частности два кристалла — цинкит и халькопирит. Было обнаружено, что эти кристаллы обладают чудесным качеством: они могут служить вентилем, выпрямлять электрический ток *. А раз так, значит их можно использовать для детектирования: отделять от несущих сигналов ток звуковой частоты.

Так и сделали. Как ни странно, но в самых первых радиоприемниках для детектирования использовались вовсе не

* Тому, кто забыл, в чем заключаются вентильные свойства диодов, можно рекомендовать еще раз обратиться к I.16.

диоды, о которых мы говорили все время, а как раз настоящие полупроводники. Но сколько же было с ними мороки!



Надо было тонкой иголкой, с острием в десятые доли микрона, на ощупь искать на кристалле чудесную точку. Чуть сдвинешь иголку в сторону — и пропадает звук. И приходилось тратить немало времени, чтобы вновь нащупать нужную точку кристалла. Где должна быть такая точка и в чем секрет ее магической силы, никто в то время сказать не мог. И не дай бог при поисках этой магической точки «сковырнуть» ее острием иголки — второй такой у кристалла могло и вовсе не быть. Иголку стали сажать на пружину, чтобы она как можно «нежнее» касалась кристалла своим острием.

Освоить всю эту премудрость удавалось немногим. На вес золота ценились в то время военными штабами армейские «слухачи», овладевшие тонким искусством поисков заколдованной точки. Все вздохнули с большим облегчением, когда электроника взамен этих кристаллов предложила лампу-диод.

А затем появились триоды, позволившие усиливать прошедшие дальние расстояния сильно ослабленные сигналы. Лампы стали применяться повсюду, а о кристаллах никто больше не вспоминал.

Так и осталось неясным, почему только отдельные точки кристалла могли выделять звуковые сигналы и почему вообще эти кристаллы детектировали сигнал.

Один из витков спирали

Диалектика утверждает, что развитие идет по спирали, двигаясь по виткам снизу вверх. Наступает момент, когда идеи прежних времен начинают звучать по-новому, в силу того что к этому времени наука успела проделать очередной «виток». Именно так и случилось с кристаллами.

Очень долго ламповые диоды удовлетворяли запросы всех областей техники. Но по мере того как локация шла по ча-

стотному диапазону все выше и выше, ее все меньше и меньше удовлетворял обычный диод. Между катодом и анодом диода есть знакомая нам паразитная емкость. Та же история, что и с триодом: чем выше частоты, тем заметней влияние емкости, а в сантиметровом диапазоне такой диод вообще работать не мог. Вот тут и вспомнили о кристаллах.

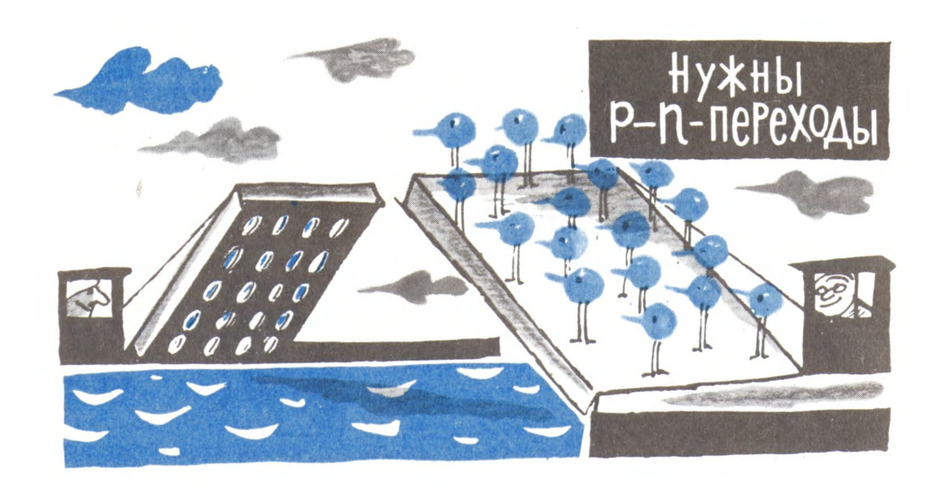
Впрочем, был еще один эпизод, когда кристаллы приобрели популярность. В 1924 году сотрудник нижегородской лаборатории Бонч-Бруевича Олег Владимирович Лосев впервые в истории электроники получил усиление без применения ламп. Основой прибора, который Лосев назвал кристодином, был полупроводниковый кристалл. Это событие наделало много шума. Американский журнал «Радио ньюс» сообщил о нем в статье под названием «Сенсационное изобретение». Другие журналы называли кристодин «изобретением, делающим эпоху», и предрекали, что кристаллы со временем займут место вакуумных ламп.

Но в те годы этого не случилось. Лампа удовлетворяла любые запросы, период расцвета вакуумной техники еще только начинался, и с каждым годом техника обнаруживала все новые и новые достоинства и неожиданные возможности вакуумных ламп.

Что касается полупроводниковых кристаллов, то наука в то время только приступила к изучению их структуры, а техника еще не могла создавать для нужд электроники чистые, лишенные примесей кристаллы. В общем развитие техники полупроводниковых кристаллов, начавшееся с первых приемников, к этому времени еще не завершило свой первый «виток».

Спустя два десятилетия локация поставила вопрос по-новому: на основе кристалла надо создать новый детектор для сверхвысоких частот! К этому времени наука накопила важные сведения о кристаллах. Физики уже понимали, что в кристаллах можно создать ток разной природы: либо поток отрицательных электронов, либо движение положительных зарядов, возникающее благодаря перемещению дырок (см. V.27—V.32).

И только тогда стало понятно, в чем заключалась сила магической точки, которую с таким трудом приходилось искать «слухачам».

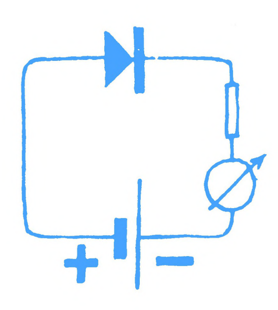


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

V. 34

Чтобы создать полупроводниковый диод, надо спарить два кристалла. Один из них должен обладать *n*-проводимостью, второй — *p*-проводимостью (см. V.33).

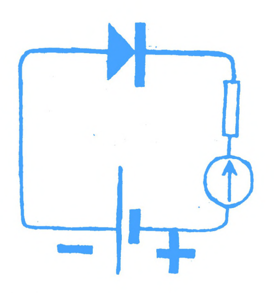
Такое устройство сможет служить вентилем не хуже лампового диода (см. I.16). Если подключить «плюс» источника напряжения к кристаллу с *p*-проводимостью, а «минус» — к его напарнику, то через границу раздела кристаллов будет течь ток.

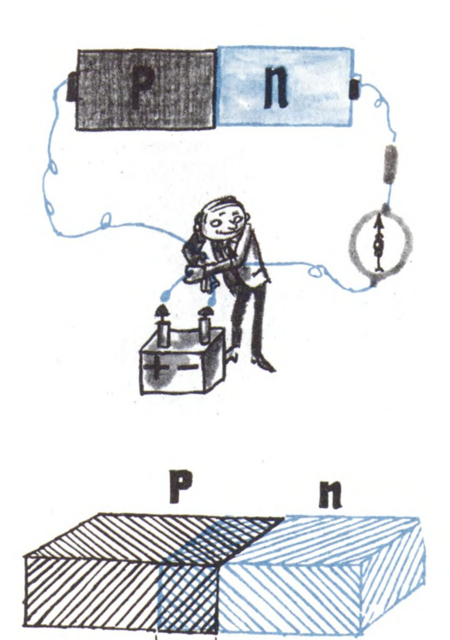




V.35

Если поменять «плюс» и «минус» местами, вентиль запрется, диод разомкнет цепь. Почему?

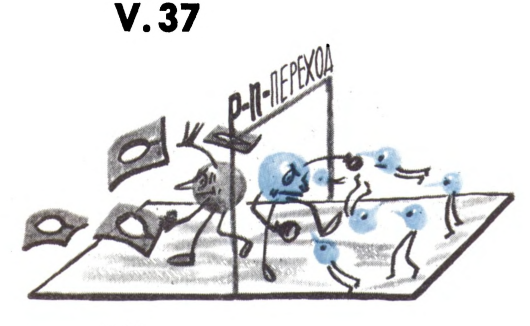




V.36

На границе раздела кристаллов, обладающих *n*- и *p*-проводимостью, возникает особая зона — так называемый *«p — n-переход»*. Толщина *p—n*-перехода составляет всего десятые доли микрона, и тем не менее именно этому тонкому слою выпала самая важная роль в полупроводниковой технике.

V.37



Каждый из атомов-доноров, отдав один из пяти своих электронов, перестает быть нейтральным и становится положительным ионом.

Акцепторы наоборот. Они склонны добавить к своим трем электронам четвертый и превратиться в отрицательный ион.

Вот эти ионы и толпятся в зоне *p* — *n*-перехода.

Отрицательные на своей стороне «оттесняют» свободные электроны, а положительные мешают движению дырок. Таким образом, зона p — *n*-перехода представляет собой для электронов и дырок своеобразный барьер.

V.38



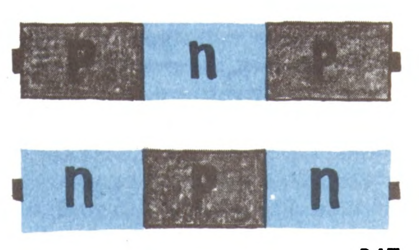
При прямом включении кристаллического диода «плюс» источника подключен со стороны *p*-проводимости, «минус» — со стороны *n*-проводимости. «Плюс» источника «толкает» положительные заряды к зоне *p* — *n*-перехода и помогает им преодолеть этот «барьер». Точно так же «минус» источника помогает двигаться электронам.

Два потока зарядов идут навстречу друг другу — через диод течет электрический ток (см. V.34).

При обратном включении полюса источника напряжения «тянут» электроны и дырки в разные стороны, барьер становится непреодолимым, ток через диод не течет (см. V.35 и V.37).

V.39

Полупроводниковый триод имеет два *p* — *n*-перехода. Участки с *n*- и *p*-проводимостью могут чередоваться по-разному, поэтому различают два типа триодов: *p* — *n* — *p* и *n* — *p* — *n*.

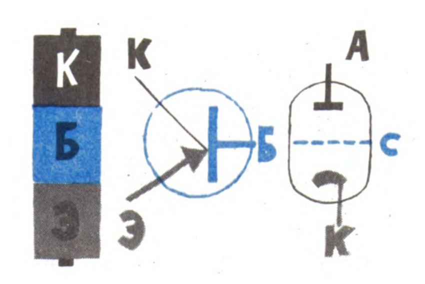


V.40

Роль катода в полупроводниковом триоде играет *эмиттер Э*. Он является источником всех зарядов, движением которых рождается ток. *Коллектор К* аналогичен аноду. Роль сетки играет *база Б*.

При усилении сигнал подается на участок *Э—Б* (между эммитером и базой). Подключив нагрузку (сопротивление) к участку *Б—К* (база — коллектор), можно снять с этой нагрузки усиленный триодом сигнал.

За счет чего происходит здесь усиление?

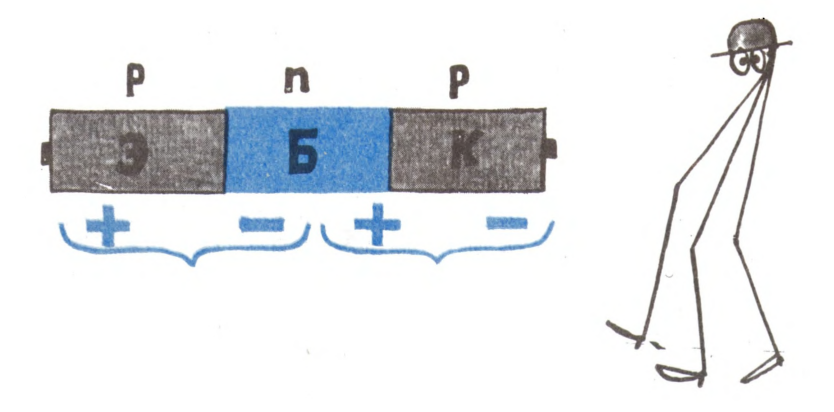


V.41

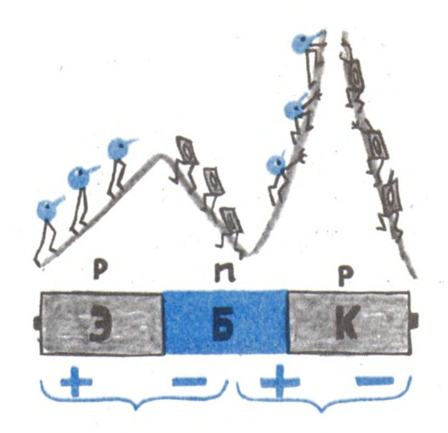
Участок *Э—Б* ведет себя как открытый вентиль: внешняя батарея помогает электронам и дыркам преодолеть барьер (так же, как на рисунке V.34).

Участок *Б—К* подобен закрытому вентилю: батарея препятствует переходу носителей через барьер (так же, как на рисунке V.35).

В результате сопротивление на участке *Э—Б* будет совсем незначительным, а на участке *Б—К* оно весьма велико.



V.42



Ток, проходящий через оба барьера, остается почти неизменным. Точнее, он несколько уменьшается за счет того, что некоторые электроны сливаются с дырками, заполняя «пустые места». Это явление называют *рекомбинацией*.

Обычно рекомбинации подвергается не более трех процентов зарядов. Это значит, что ток перехода *Б—К* составит 97 процентов от тока участка *Э—Б*. В то же время сопротивление перехода *Б—К* (закрытого вентиля) в десятки раз больше, чем сопротивление перехода *Э—Б* (открытого вентиля).

Итак, ток почти одинаков, сопротивление выхода в десятки раз больше сопротивления входа. Значит, согласно закону Ома напряжение сигнала на выходе будет превышать напряжение входного сигнала тоже в десятки раз.

Этим и объясняется усиление.

Что искали «слухачи»?

В то время, когда «слухачи» овладевали искусством поиска магической точки, считалось, что выпрямление тока происходит на границе кристалла с металлом, то есть в том месте, где острие иглы упиралось в кристалл. Но оказалось, что выпрямление и детектирование происходит совсем иначе. Поверхность кристалла за счет действия кислорода и влаги воздуха покрывается пленкой окисла. В некоторых кристаллах по счастливой случайности эта пленка тоже имеет полупроводниковые свойства. При этом для выпрямления ее проводимость должна отличаться от проводимости самого кристалла: если в кристаллах преобладают свободные электроны (*n*-проводимость), то пленка окисла должна обладать *p*-проводимостью. В этом случае кристалл с пленкой окисла

образуют полупроводниковый вентиль, изображенный на рисунке V.34.

Пленка окисла возникала в силу случайных воздействий, никто не знал о ее значении, никто не следил за тем, насколько ровным и прочным слоем покрыт кристалл. Естественно, что при таких условиях можно было лишь чисто случайно нащупать такую точку, где пленка тонка и прочна и образует вместе с самим кристаллом *p* — *n*-переход. Стоило лишь поцарапать иглой эту тонкую пленку, и переход исчезал — кристалл переставал выпрямлять. Отсюда и появление пружинки и долгие поиски заколдованной точки нежным прикосновением тонкого острия.

Пытались в то время делать и плоскостные диоды, соприкасая два разных кристалла — цинкит и халькопирит. И опять-таки, в силу плохой поверхности окислов, обеспечивавших *p*- и *n*-проводимости, выпрямление осуществлялось не по всей плоскости, а только в отдельных точках.

Все это стало понятным значительно позже, когда примитивные детекторные приемники уже давно уступили место ламповым супергетеродинам, а «слухачи» стали радистами первого класса и обеспечивали надежную связь с любым уголком Земли. Но к этому времени возникла необходимость решения новой задачи: создания кристаллического детектора для сантиметрового диапазона волн.

К этому времени физика твердого тела уже хорошо изучила природу кристаллов и электрические явления, происходящие в полупроводниках. Большой вклад в эти исследования внес советский ученый академик Абрам Федорович Иоффе, японские ученые Ториката и Йокояма, немец Карл Браун и англичанин Иклз.

А техника научилась получать чистые кристаллы кремния и германия, а затем добавлять в них нужные примеси, создающие *n*-проводимость или *p*-проводимость.

Чтобы представить себе, чего стоила эта победа, достаточно привести следующие цифры: в кристаллах, употребляемых для создания полупроводниковых приборов, допускается лишь один атом ненужных примесей на миллиард атомов германия или один атом примесей на 1000 миллиардов атомов кремния! Из таких вот сверхчистых кристаллов, обладающих *n*- и *p*-проводимостями, и создаются приборы, выполняющие функции электронных ламп, — полупроводниковый диод (см. V.34) и полупроводниковый триод (см. V.40). Первый полупроводниковый триод был создан американскими физиками Бардиным и Брэттэйном в 1948 году. В кристалл германия, обладающий *n*-проводимостью, были впаяны

два точечных контакта с p-проводимостью. Впоследствии такие триоды получили название *точечных* — в отличие от *плоскостных* (см. V.40).

Первый образец плоскостного триода был создан американским физиком Шокли в 1951 году.

Мир оценил значение этих открытий: Нобелевская премия, выданная трем создателям первых полупроводниковых триодов, ознаменовала этот важнейший этап.

После появления полупроводниковых триодов все разработчики электронной аппаратуры стали все реже и реже вспоминать о вакуумных лампах и везде, где это возможно, отдавать предпочтение полупроводникам. Ведь, помимо малых размеров, полупроводники обладают и целым рядом других преимуществ. Они потребляют гораздо меньше энергии и служат дольше, чем вакуумные лампы, приблизительно в десять раз.

Полупроводниковый диод или триод не нуждается в нити накала, без которой не обходится ни одна из электронных ламп. Эта маленькая деталь влечет за собой большие последствия. Чуть ли не половина энергии, расходуемой электронными лампами, уходит на то, чтобы накалить их нить.

При включении и выключении ламп нить то раскаляется, то остывает. Подобные «встряски» выводят ее из строя значительно раньше других деталей, которые содержатся в лампе. «Где тонко, там и рвется», — говорится в пословице. В электронной лампе раньше всего рвется ее тонкая нить. А каждый отказ электронной лампы вещь весьма неприятная — весь прибор выходит из строя, и не так-то просто бывает узнать, какая из многих десятков ламп (а в электронной машине — из многих тысяч!) в данном случае подвела. Уже одного этого преимущества (отсутствия нити накала) достаточно, чтобы во всех случаях, когда это возможно, специалист предпочел вакуумным электронным приборам приборы из полупроводников. А если учесть к тому же их высокую прочность, малые размеры и незначительный вес, то станет вполне очевидно, что с появлением полупроводниковых приборов электроника пережила как бы второе рождение; в ее развитии начался новый, весьма плодотворный этап.

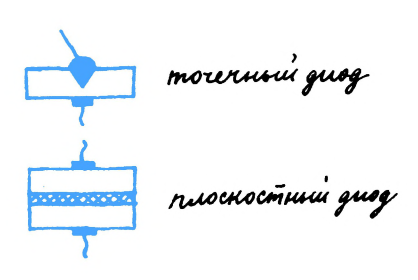


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

V.43

Точечные контакты, применяемые в полупроводниковых диодах, заменили иглу и пружинку, причинявшие столько хлопот «слухачам».

Диоды с точечными контактами хороши для детектирования на сверхвысоких частотах, потому что емкость точечного контакта чрезвычайно мала. Зато у них есть другой недостаток: через этот контакт нельзя пропустить сильный ток.

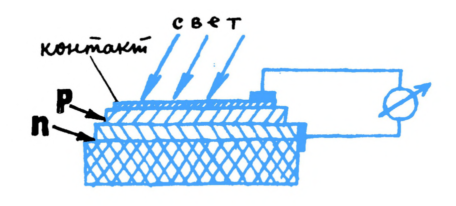


Для детектирования мощных сигналов и выпрямления сильного тока создали *плоскостные диоды*. Емкость таких диодов значительно больше, зато они пропускают ток до 2 тысяч ампер.

V.44

Полупроводниковый диод нашел себе применение во множестве областей.

Широко используются так называемые *фотодиоды*, которые преобразуют световую энергию в электрический ток.



Во многих цехах «глазки», содержащие фотодиоды, обеспечивают безопасность рабочего: стоит лишь по рассеянности протянуть руку в опасную зону, луч прерывается, и сигнал с фотодиода мгновенно останавливает станок.

Фотодиоды в сочетании с элсктрическими счетчиками импульсов ведут на фабрике имени Клары Цеткин и на заводе имени Карпова учет мыла и папирос.

Таким способом можно считать все что угодно: спички, иголки, колеса автомобилей или количество пассажиров в метро. «Глазок» может освобождать ленту конвейера от брака: если в детали нет нужных отверстий, «глазок» подает сигнал автомату, и автомат снимает с ленты деталь.

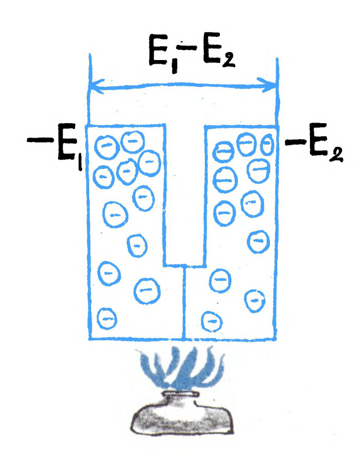


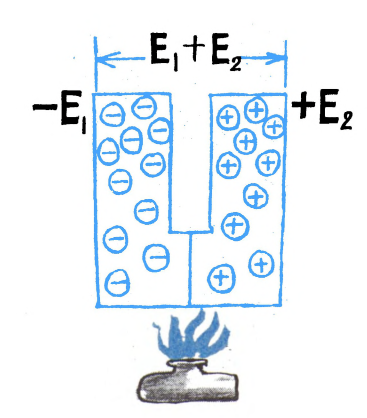
V.45

Благодаря полупроводникам техника обрела возможность получать электроэнергию непосредственно из тепла.

До появления полупроводниковых преобразователей были известны металлические термопары.

При нагревании металлических стержней электроны, срываясь с атомных оболочек, обретают свободу





(см. I.8). С увеличением температуры электроны движутся все энергичнее, им становится тесно, и они устремляются к холодным концам. В термопаре стержни сделаны из различных металлов, поэтому заряды концов будут одинаковы по знаку («минус»), но различны по величине (на одном конце «минус» большой, а на другом «минус» маленький), между концами возникнет разность потенциалов $(E_1 - E_2)$.

Если вместо металлов взять полупроводниковые стержни с *p*- и *n*-проводимостью, то на одном конце скопляются электроны, а на другом — дырки. Разность потенциалов будет значительно больше, чем в случае металлической термопары, так как на одном конце ее образуется «минус», а на другом образуется «плюс».

Благодаря этому коэффициент полезного действия (кпд) полупроводниковой термопары выше, чем металлической, примерно раз в пятьдесят.

V.46

В природе есть множество обратимых явлений.

Электроника тоже использует обратимость. В одних приборах ток рождает магнитное поле, а в других под действием переменного магнитного поля появляется ток.

Обратимость присуща и термопарам.

Разность температур на концах полупроводниковых или металлических стержней



приводит к возникновению разности электрических потенциалов (см. V.45). Если же поступить наоборот и приложить к концам термопары разность потенциалов, полученную от внешних источников напряжения, то в местах спаев полупроводниковых или металлических стержней возникнет разность температур.

Подобные опыты производились еще академиком Ленцем: на глазах изумленной публики (он читал тогда лекции в Петербурге) с помощью металлической термопары Ленц превращал в ледяной комочек каплю воды.

Однако с помощью металлических термопар можно создать перепад температур всего лишь в несколько градусов. Зато полупроводниковая термопара может дать перепады градусов в шестьдесят. А это уже ощутимая величина.

V.47

Полупроводники дали возможность превращать в электричество различные формы лучистой энергии — радиоактивные, тепловые, световые и, в частности, солнечные лучи.

Солнечные батареи очень удобны для спутников:

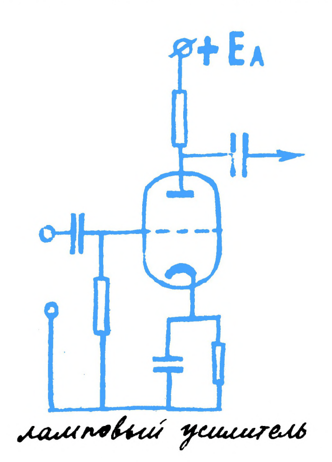


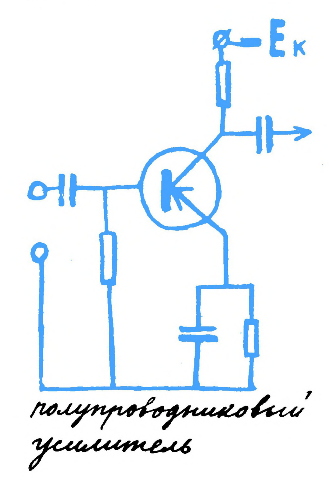
в космосе никогда не бывает пасмурно — облака остаются внизу.

Если расположить полупроводниковый диод рядом с радиоактивным материалом, получается *атомная батарея,* которая способна давать электрическую энергию в течение многих лет.

V.48

Подлинную революцию в технике сделали *кристаллические триоды*. Удивляться этому не приходится: помните, сколько возможностей дал в свое время электронике ламповый триод? Именно он позволил создать генераторы и усилители,





смесители и модуляторы радиосигналов — все существующее многообразие приемников, передатчиков и измерительных схем.

Полупроводниковый триод позволяет усилить сигнал не хуже лампового триода. А поскольку в характеристике его тоже есть криволинейные участки, он позволяет производить с сигналом все многочисленные операции, которые мы рассмотрели, знакомясь с обширной областью, названной нами «королевством кривых зеркал».

Проект электронного «мозга»

Областей применения полупроводников существует теперь так много, что даже простой перечень занял бы много страниц. В предыдущем разделе мы описали лишь некоторые примеры, по которым можно судить о разнообразии применения и свойств полупроводников. Но тут читатель вправе спросить: почему разговор о полупроводниковых приборах мы ведем в главе «Элементы «умных» машин»?

Вопрос в общем-то закономерный. Полупроводники нужны не одним только электронным вычислительным машинам. Полупроводниками интересуются специалисты множества областей, начиная от хирургов и кончая металлургами. И не только специалисты. Полупроводники нужны всем. Даже тот, кто обходится дома радиоприемником на электронных лампах, все равно захочет иметь в придачу еще и походный приемничек величиной с портсигар.

Нет спора, такой приемник удобен. Но когда речь идет об электронных машинах и автоматах, то их размеры и вес — это уже не вопросы удобства, а вопросы жизненности машин. Именно габариты порой решают будущее машины: быть ей или не быть.

Очень нужна, например, машина для вождения самолетов: ведь скорости стали такими огромными, что пилот порой просто не успевает принимать те решения, без которых нельзя вести самолет. Машина «соображает» намного быстрее. Но беда заключается в том, что она «соображает» лишь в рамках заданных ей программ. А различных условий полета возникает так много, что никакой программой заранее их невозможно учесть и предусмотреть. Вот тут машина пасует перед пилотом. Чтобы расширить ее возможности и приблизить их к искусству пилота-человека, нужны очень

сложные схемы, громадная память машины, способность накапливать опыт, становясь все квалифицированнее и «умней». Если все эти требования воплотить в конкретной конструкции, машина выйдет настолько громоздкой, что ее не поднимет в воздух ни один самолет.

Тут сталкиваются два требования, которые противоречат друг другу: с одной стороны, машина должна быть как можно компактней, а с другой стороны — как можно «умней».

Чтобы это противоречие стало наглядней, представим себе, что нашелся конструктор, который задался целью построить машину такую же совершенную, как человеческий мозг. Перед ним возникает безбрежное море вопросов. Какие взять за основу ячейки? Какие из них строить схемы? Какую задать программу?

Но прежде чем углубляться в эти вопросы, конструктор, очевидно, захочет представить, как вообще будет выглядеть этот «мозг».

Согласно последним научным данным, кора головного мозга содержит 10^{10} клеток (нейронов). Возможно, что клеток гораздо больше. 10^{10} — число весьма приблизительное: ведь нейроны никто не считал.

Но пусть даже только 10^{10}. Как будет выглядеть «мозг», в котором вместо 10^{10} клеток есть, скажем, 10^{10} штук триггеров?

Если конструктор возьмет за основу обычные лампы и элементы, то при самой удачной конструкции больше 5 деталей в каждом кубическом дециметре объема ему разместить не удастся.

Каждый триггер содержит около 10 деталей, в 10^{10} триггерах их будет 10^{11} штук. Значит, объем такого прибора составит:

$$\frac{10^{11}}{5}\, дм^3 = 2\cdot 10^{10}\, дм^3 = 20\cdot 10^6 м^3.$$

Этот объем можно представить себе наглядно: гигантский пенал длиной в 2 километра и по 100 метров в высоту и в ширину. Солидное сооружение! А представляете себе, какой понадобится источник энергии, чтобы питать 10^{10} триггеров? Но сможет ли хотя бы такое фантастическое устройство работать не хуже, чем настоящий мозг? Ничуть не бывало!

Во-первых, вопросы надежности. Если предположить, что каждый триггер в среднем раз в 5 лет выходит из строя, значит в этой гигантской системе в течение каждой секунды выйдут из строя в среднем около 60 триггеров.

А поскольку электронные схемы построены так, что отказ каждого из элементов нарушает работу всей схемы, «мозг» будет все время испорчен: вместо работы — непрерывный ремонт.

Но допустим, что по какой-то счастливой случайности фантастический «мозг» оказался исправным и работал 5—10 минут. Был ли он достаточно «умным» хотя бы в эти минуты? Нет, разумеется. Ведь возможности настоящего мозга определяются не только количеством клеток. Главное — взаимодействие. Если бы даже и удалось построить систему из 10^{10} триггеров, то никто пока еще не представляет, по какой схеме их нужно соединять. А кстати сказать, триггер вовсе не заменяет нейрона. Сходство их заключается в том, что и нейрон и триггер могут иметь два состояния, обозначаемых через «1» и «0» (см. V.5 — V.8). Но если триггер на все приходящие импульсы реагирует одинаково, то нейрон различает их интенсивность и частоту. У триггера есть только один вход, а нейрон связан со многими клетками, и его «ответ» зависит от сочетания импульсов и от того, откуда они пришли. При создании схемы нейрона одним триггером не обойдешься: схема искусственного нейрона намного сложней.

Едва ли кто-нибудь из современных конструкторов рискнул бы взяться за создание целого электронного «мозга».

Зато нашлось очень много желающих «сконструировать» основную ячейку мозга — нейрон. Уже разработано больше ста типов схем, работающих подобно нейрону. Мы говорим «подобно», потому что свойства живых нейронов еще не изучены до конца.

Искусственные нейроны называют нейримами, нейристорами или артронами. Все они намного сложнее триггера, число элементов схемы нейрима больше, чем число элементов простого триггера, приблизительно в 10 раз.

Если бы кто-нибудь захотел построить искусственный мозг из 10^{10} нейристоров или артронов, то «пенал» получился бы больше еще в 10 раз. Задача на первый взгляд кажется утопической. Однако не будем спешить делать выводы. Ведь мы еще не учли возможностей электроники будущего. Мало того: все рассуждения велись вообще на уровне вчерашнего дня.

Зачем строить искусственный мозг на лампах, если есть полупроводники? А кроме того, надо еще учесть, что появление полупроводниковых приборов заставило специалистов пересмотреть конструкцию всех элементов и блоков, сделать их сначала *миниатюрными,* а затем даже *микроминиатюрными,* уменьшив размеры в несколько сот тысяч раз.

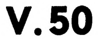


ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

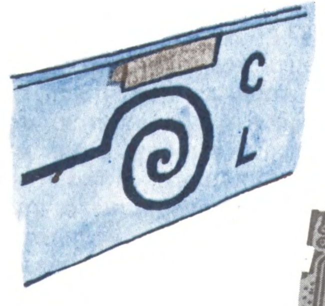
V.49

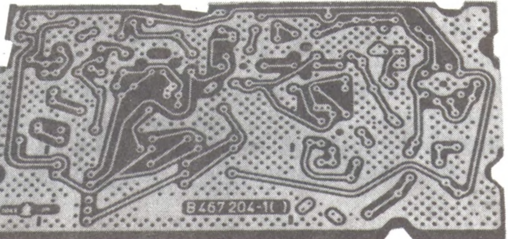
Рядом с лампой катушка, конденсатор, сопротивление всегда казались малютками. Но для полупроводниковых приборов элементы старой конструкции чересчур велики.

V.50



Вместе с полупроводниками в производство электронной аппаратуры стали внедряться *печатные схемы.* На изолирующей плате (пластинке) отводится место для полупроводниковых





триодов и диодов, а затем печатным способом прорисовываются сопротивления, емкости, индуктивности и соединительные провода.

Чтобы создать емкость, достаточно нарисовать две обкладки по обе стороны платы. Спираль, нарисованная на плате, заменяет катушку. Тонкими зигзагообразными линиями создаются сопротивления нужной величины.

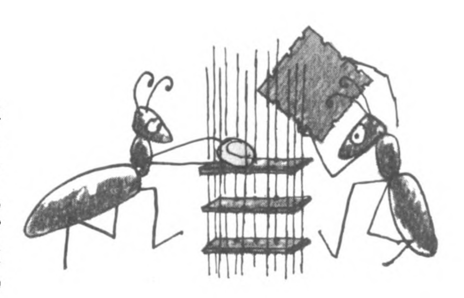
V.51

Стремясь уменьшить объем электронных приборов, конструкторы пришли к выводу, что в приборах остается много пустого места из-за того, что все детали (лампы, катушки, сопротивления) имеют разный «фасон». Тогда родилась идея их унификации. На квадратные пла́тки одинаковых размеров устанавливаются диоды, триоды, емкости, сопротивления — на каждой платке один элемент.



V.52

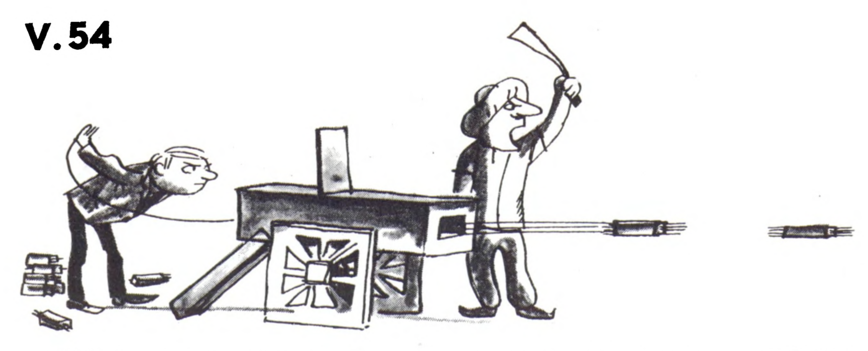
Пла́тки располагаются друг над другом, и получается нечто подобное этажерке: на полках лежат элементы, а по рейкам циркулирует ток. При конструировании такого блочка очень важно не спутать полки и рейки: например, средняя рейка справа должна соединять конденсатор, лежащий на верхней полке, с коллектором триода, находящегося ниже на несколько этажей.



V.53

Когда вся схема собрана, ее заливают специальным составом, и «этажерка» превращается в миниатюрный и монолитный *микромодульный блок.*

V.54



Объем электронных приборов из микромодулей меньше объема приборов на лампах примерно в 2 тысячи раз.

Кроме того, приборы из микромодульных блоков отличаются необычайной прочностью. Если приемник на лампах выходит из строя от толчков и сотрясений, то микромодульные приборы способны выдерживать даже очень сильный удар.

Чтобы проверить такие блоки на прочность, их выстреливают из специальной пушки. Если после подобной «встряски» блок продолжает работать, значит прочность его достаточно высока.

V.55

Следующим шагом миниатюризации электронной аппаратуры явились *тонкие пленки.*

На пластину из изолятора наносится пленка металлов или полупроводников. Толщина этой пленки ничтожна: иногда ее делают равной размеру молекул, уложенных в один ровный слой!



Тонкая пленка металла обладает большим сопротивлением. Благодаря этому удается уместить миллионы ом в одном миллиметре длины.

Пленочный конденсатор подобен трехслойному бутерброду: пленка металла, пленка изолятора (диэлектрика), а сверху опять металл. Благодаря тонкому диэлектрику удается создать очень большую емкость при малых размерах пластин (сравните с рисунком III.21).

Такими же трехслойными получаются и триоды: слой с *p*-проводимостью, затем слой с *n*-проводимостью, а потом снова с *p*-проводимостью.

Размеры таких триодов настолько ничтожны, что на почтовой марке их размещается до 20 000 штук!

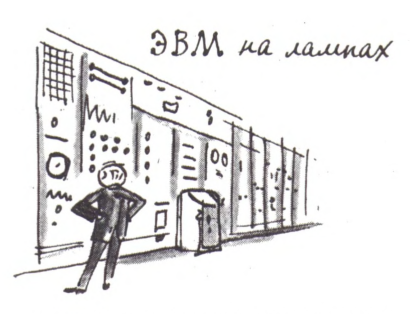
Вот наглядная иллюстрация тех успехов, которые достигнуты в последние годы «микроскопической электроникой», — ведь 20 000 вакуумных ламп заняли бы целый вагон!

V.56

Последним словом в деле создания сверхминиатюрной электронной аппаратуры являются *твердые схемы.*

Взяв за основу кусок керамики или полупроводниковый кристалл, создатели твердых схем подвергают их технологической обработке с помощью физических и химических средств.

Тончайшим «узором» покрывается вся поверхность материала. В одних местах он подвергается химическому травлению и окислению, в других — диффузии и осаждению пленок, в третьих — термической обработке, в четвертых — воздействию электрических или магнитных полей.









В результате такой обработки на поверхности образуется сложная сеть микроячеек, каждая из которых обладает определенным комплексом электрических и магнитных свойств. Затем обработанную поверхность покрывают стеклянной пленкой, и кусок материала превращается в твердую схему. Действие каждой из созданных микроячеек подобно работе схемы, состоящей из многих триодов, диодов, сопротивлений, индуктивностей и емкостей.

Твердые схемы отличаются прочностью и надежностью, очень малым расходом энергии и исключительно малым объемом: электронный блок, выполняющий целый комплекс расчетных или логических операций, может пройти сквозь ушко швейной иглы!

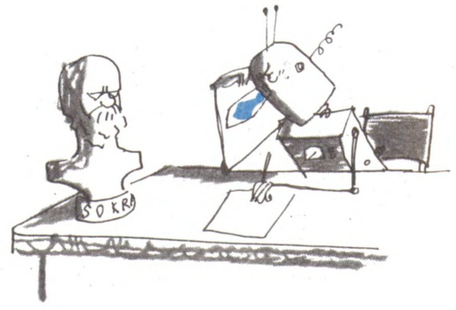
Поистине, искусство создателей твердых схем приближается к совершенству природы: в малюсеньком кусочке материала происходят сложные взаимосвязанные, целенаправленные процессы, течет своеобразная «электронная жизнь».

V.57

Искусственный «мозг» на микромодульных блоках получился бы в 2 тысячи раз меньше, чем ламповый. И все же система из 10^{10} электронных «нейронов» при высоте в 10 метров имела бы по 100 метров в ширину и в длину и заняла бы целый квартал.

Схема «мозга» из тонких пленок займет объем еще в 100 раз меньший и превратится в куб с десятиметровым ребром.

Еще меньшим получился бы «мозг», основанный на твердых схемах. Этим совершенство природы, конечно, еще не достигается, но тем не менее отдельные функции мозга могут теперь воспроизводиться намного полнее, чем всего лишь несколько лет назад.



Модели живого

За последние годы электроникой создано множество всевозможных моделей (см. V. 17). Моделировались режимы плавки металлов и циклы их механической обработки, полеты снарядов, ракет и самолетов, химические и физические процессы, перевозка различными видами транспорта, финансовые операции и ход выполнения производственных планов.

Но самыми сложными были и остаются модели процессов, протекающих в живом организме. Начнем с простого примера.

Не приходилось ли вам искать в темноте собственный нос? Легко ли вам удавалось нащупать его кончик кончиком пальца? Очевидно, легко. Но попробуйте найти в темноте кончик чужого носа. Вот тут уж так легко не получится — придется долго шарить руками, пока случайно не натолкнетесь на него. А если владелец носа начнет поворачивать голову? Снова придется искать наугад. Зато собственный нос в темноте не теряется, и в любую минуту вы прикоснетесь к нему безошибочно. Почему?

Потому что в мозг поступают сигналы от мышц лица и от мышц руки. Мозг сравнивает их положение и находит сигнал ошибки, или, как говорят математики, разность координат. В любой момент мозг может послать в исполнительный орган (руку) команду и свести сигнал ошибки к нулю.

Тот же самый режим слежения может осуществляться и в отношении посторонних предметов (в том числе и чужого носа) при условии, что эти предметы освещены. Мозг получает сигналы от ваших глаз, фиксирующих положение этих предметов, и от вашей руки. А в темноте слежения нет. Для него необходимо иметь прямую связь и обратную. По прямой связи идут команды от мозга к мышцам, а по обратной — сигналы о том, насколько близок предмет.

Схема связей в живом организме очень похожа на схему любого следящего автомата. И тут и там система имеет объект регулирования, исполнительный орган, сигналы ошибки, прямую и обратную связь.

С этого, собственно, и началась кибернетика: были найдены общие принципы управления, которые использует и автомат и живой организм. Однако, помимо сходства, есть и различия, и далеко не все из них пока удалось понять.

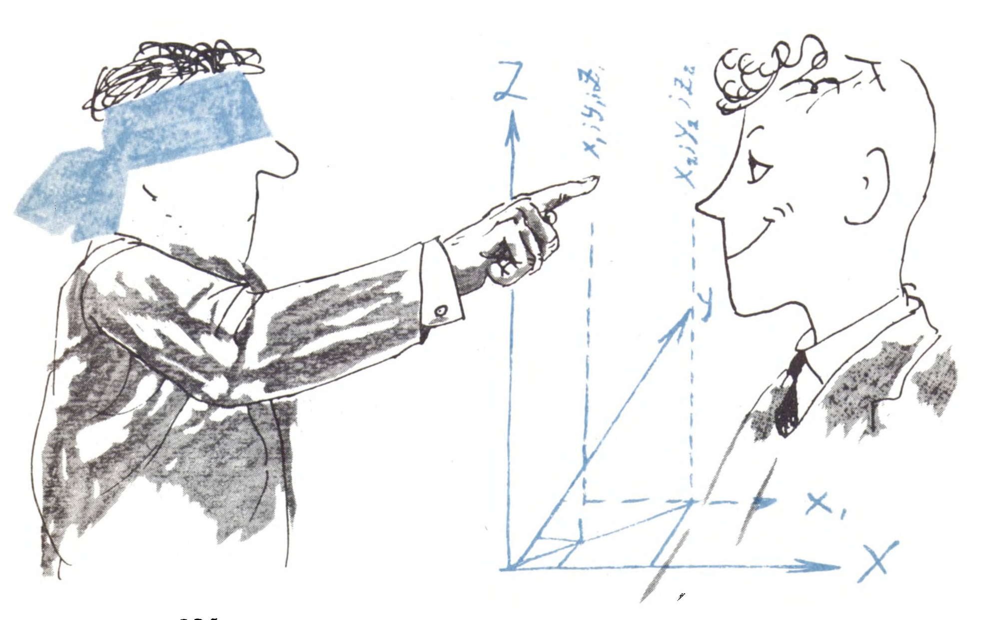
Работу мышц моделировать научились достаточно точно. Удалось даже сконструировать автоматическую руку, кото-

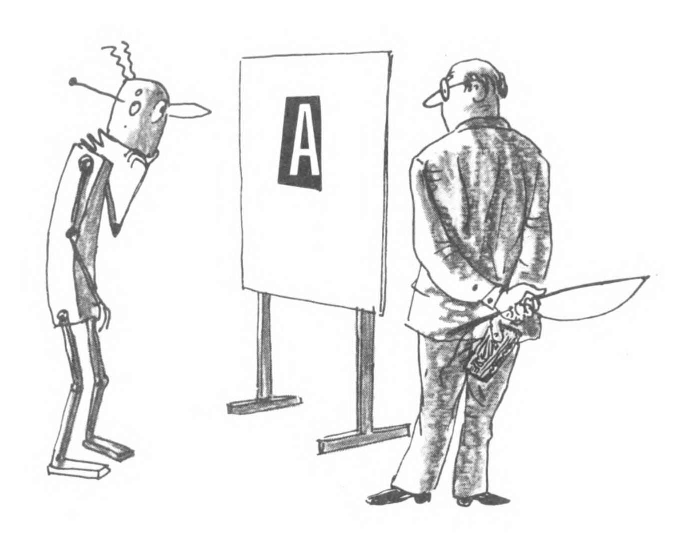
рая, получая усиленные биосигналы от мышц руки человека, в точности повторяет все ее движения.

Моделировать мозг намного сложнее. И тем не менее немалых успехов удалось достигнуть и здесь. Конечно, речь идет пока о моделировании только отдельных функций. Однако и тут возникает немало трудностей. Не удивительно: ведь мозг — это сложнейшая в мире система, а в руках инженеров нет ни руководства, ни схем. Они не имеют возможности даже краешком глаза заглянуть в мозг в процессе его работы и довольствуются лишь предположениями и проверкой их на электронных моделях. Но даже этот косвенный путь уже принес немало плодов.

Самым ярким примером может, пожалуй, служить машина, опознающая зрительный образ. Она называется перцептроном. Модель глаза, созданная для этой машины, содержит сотни фотоэлементов. Ее искусственный мозг состоит из тысяч электронных «нейронов», объединенных в сложную сеть.

Процесс обучения перцептрона напоминает процесс дрессировки животного. Машине показывают букву, которую она должна отличать от других. Если машина ее «узнала», в «мозг» посылают «сигнал поощрения», который закрепит возникшую между нейронами связь. Дрессировщик обычно дает в таких случаях любимое лакомство. Если машина спу-





тает данную букву с другой, ей пошлют «сигнал наказания» (он заменяет хлыст). «Увидев» букву раз 10—15, машина начнет ее «узнавать». При этом она различит букву даже в том случае, если та имеет другие размеры или если при ее печатании применен другой шрифт.

Один перцептрон сконструирован в Киеве, другой — в Корнельском университете (США). Американский перцептрон разработан по заказу военного ведомства. Он узнает не только печатные буквы. Его научили, глядя на фотоснимок, сделанный с воздуха, «узнавать» ангар или сидящий на земле самолет.

Природе это давно известно

Несомненно, что в области моделирования определенных процессов живых организмов электроника достигла немалых успехов. Но многое еще остается неясным. Многое еще предстоит изучить и создать.

И вот на стыке двух, казалось бы, совершенно различных наук — биологии и электроники — рождается новая область знания. Ее назвали *бионикой*. Оказалось, что у биологии и электроники есть общие интересы, и они могут во многом друг другу помочь.

Как всегда, все началось с малого. Давно замечено, что

самцы некоторых насекомых улетают от самок на многие километры, а затем безошибочно возвращаются к ним.

Советский энтомолог Фабри высказал предположение, что между самцом и самкой существует радиосвязь. Для проверки этой гипотезы он посадил в судок самку ночной бабочки «малый павлиний глаз», и вскоре с разных концов к ней слетелось около шестидесяти самцов. Самцы были пойманы, помечены знаком и удалены в разные стороны за многие километры. Через 40 минут помеченные самцы снова вернулись к самке!

Предположив, что связь осуществляется в инфракрасном диапазоне частот, ученый посадил самку в банку, сделанную из стекла, не пропускающего инфракрасных лучей. Предположение подтвердилось: «верные рыцари» уже не летели на ее призывный сигнал.

Далее, предположили, что антенной, принимающей инфракрасные волны, служат усики насекомых. И действительно, самцы, лишенные усиков, тоже не могли обнаруживать своих шестиногих подруг.

На первых порах такие открытия вызывали много сомнений. Трудно было свыкнуться с мыслью, что радио, относящееся к числу величайших заслуг XX века, «изобретено» природой миллионы веков назад. Неужели приоритет в области всех связанных с радио изобретений принадлежит только ей?

Но фактов накапливалось все больше и больше, и в конце концов люди поняли, что природа достигла здесь такого высокого совершенства, что качества создаваемых ею «приборов» остаются непревзойденными и по сегодняшний день.

Теперь досконально изучены характеристики многих подобных «приборов». Так, например, известно, что природа снабдила летучую мышь своеобразным локатором, работающим в ультразвуковом диапазоне. Он излучает серию импульсов, длительность которых составляет две тысячные доли секунды. А несущая частота изменяется в течение импульса от 45 до 90 килогерц. Значит, природа применяет здесь частотную модуляцию. Импульсы следуют друг за другом с частотой 10—12 герц, когда же мышь подлетает к препятствию, частота следования импульсов возрастает до 250 герц.

А у моли, которой питаются мыши, уши подобны маленьким микрофонам. В диапазон их «настройки» как раз укладываются все частоты, излучаемые «локатором» мыши: ученые определили, что уши моли воспринимают сигналы от 10 до 100 килогерц.

Удалось даже подключить этот микроминиатюрный «прибор» к усилителю. В результате был создан прекрасный приемник для обнаружения сигналов летучих мышей.

Такое обилие цифр в рассказе о мыши и моли с непривычки кажется странным. Будто речь идет не о живых организмах, а о каких-то технических средствах, созданных руками людей.

Ничего не поделаешь. Последние достижения бионики все больше и больше убеждают нас в том, что для изучения многих вопросов биологии требуется сугубо инженерный подход.

Тот, кто видел полет летучих мышей, наверняка обратил внимание на сложность его траектории. Мышь мечется из стороны в сторону, казалось бы, совершенно бесцельно. На самом деле в каждом ее движении изумительно точный расчет. Схватив на лету насекомое, она тут же меняет курс в погоне за новой жертвой, попавшей в поле обзора ее «локатора». Ученые подсчитали, что мышь уничтожает в среднем по одному москиту каждые 6 секунд.

Совершенный «локатор», которым природа снабдила летучую мышь, позволяет ей держать окружающее пространство под постоянным контролем. Он обеспечивает и эффективность погони за насекомыми и безопасность стремитель-



ного полета: мышь своевременно замечает и огибает препятствия, встречающиеся ей на пути.

По роду работы локатор летучей мыши очень сходен с аэродромным локатором, предназначенным для обзора пространства при посадке и выведении самолетов на курс. Но есть между ними и заметная разница: вес аэродромных локаторов исчисляется тоннами, а «локатор» летучей мыши весит 0,1 грамма!

Вот это действительно миниатюрность! И надо заметить при этом, что многие качества созданных природой миниатюрных «локаторов» до сих пор остаются загадкой.

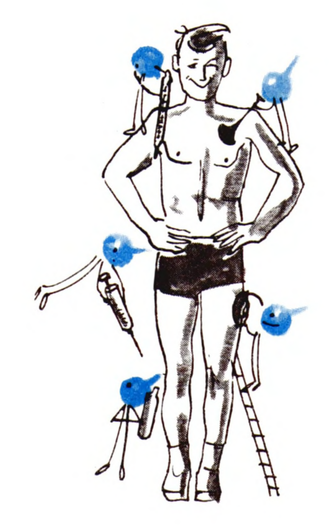
Нелегко, например, объяснить, каким образом летучая мышь отличает свой отраженный сигнал от сигналов своих сородичей или от создаваемых при проведении опытов специальных помех. Когда будет найден ответ на эти вопросы, очевидно, удастся добиться существенных улучшений всех используемых современной локацией средств.

Кстати, пример этот не единичен. «Гидролокатор» дельфинов или морских свинок значительно превосходит по точности, дальности и способности обнаружения очень маленьких препятствий те средства, которыми пользуется современный подводный флот.



ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

V. 58



Слово «бионика» произошло от слияния слов «биология» и «электроника». Кроме бионики, есть еще *биологическая электроника,* которая хотя и сходна с бионикой по названию, но имеет свой круг задач.

Бионика изучает и моделирует процессы, свойственные живым организмам. А биологическая электроника создает приборы, помогающие изучать организм. Эти приборы находят себе применение и в медицине.

V. 59

Современная медицина с электроникой связана самыми тесными узами. Попробуйте представить себе поликлинику без рентгеновских аппаратов, позволяющих заглядывать внутрь организма, без электрокар-

диографов, пишущих ритмы работы сердца, без методов лечения заболеваний с помощью ультравысоких частот. Отними все это у медицины, и современной ее уже попросту не назовешь.

Все эти средства медицине дает электроника. Рентгеновы лучи, проникающие в глубь живых тканей, образуются с помощью электронов, направленных на специальное зеркало концентрированным и интенсивным пучком. Электронные генераторы вырабатывают сигналы для лечения с помощью ультравысоких частот. Электронные лампы усиливают сигналы, посылаемые пульсирующим сердцем в прибор для снятия электрокардиограмм.

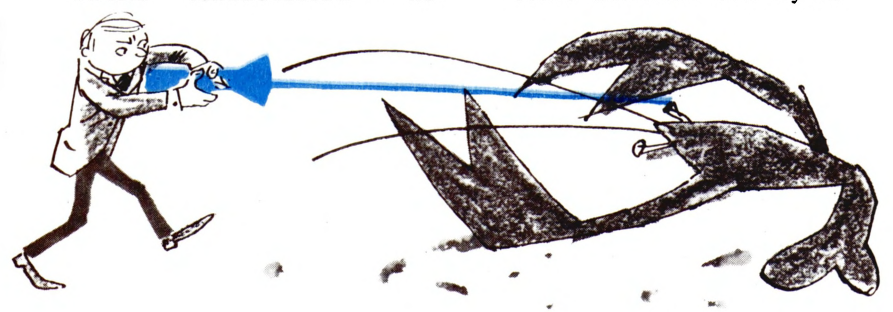
V. 59, a

Самое лучшее, что создает электроника, она с готовностью отдает медицине для продления жизни и сохранения здоровья людей. Стоило лишь появиться на свет электронным машинам, как сразу же и им здесь нашлось применение: сопоставляя множество признаков, они моментально и точно ставят диагноз, потому что в памяти одного электронного «мозга» сохраняется опыт многих врачей.



V.60

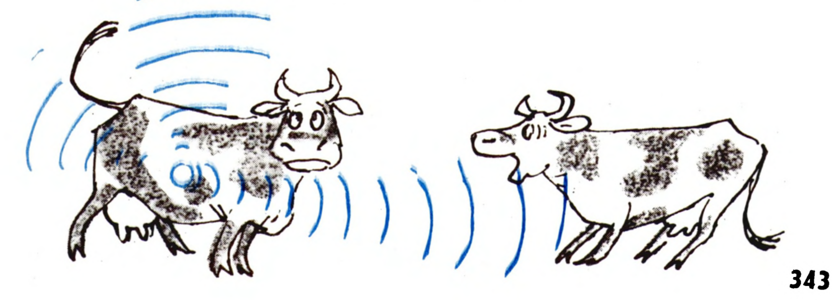
Техника еще не исследовала всех возможностей лазеров, а медицина уже сейчас начала их применять. О работе их в хирургии мы уже говорили. С помощью тех же лучей попытались бороться с самым страшным бичом человечества — изжить коварный, безжалостный рак. Группа хирургов Бостона во главе с доктором Макграффом с помощью излучения лазера излечила до 50 процентов зараженных раком подопытных обезьян. Можно надеяться, что человеку, страдающему от рака, будут тоже полезны эти лучи.



V.61

Очень ценными для медицины оказались транзисторы, потому что для ряда исследований прибор должен иметь очень малый размер. На основе транзисторов удалось создать своеобразный «передатчик-пилюлю». Больной глотает такую «пилюлю», и она, достигнув желудка, сообщает, как там обстоят дела. Те же приборы оказались полезными и в животноводстве.

По пастбищам Польши разгуливают коровы, а в желудке каждой из них есть подобный прибор. Принимая его сигналы, польские ученые наблюдают процесс усвоения пищи, чтобы найти коровам эффективный питательный рацион.



V.62

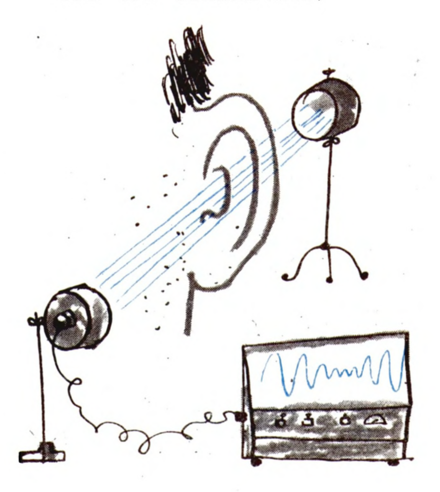


Курьезный случай произошел недавно в Америке. Два пациента обратились к врачам с весьма необычной жалобой: обоих преследовал голос, который все время предлагал им что-нибудь покупать; расхваливались то мыло, то холодильники. И так изо дня в день.

Нарушения психики врач-психиатр не обнаружил. Медицина терялась в догадках. И вот совершенно случайно вскрылась одна существенная деталь. Оказалось, что оба «больных» недавно поставили зубные коронки, причем ставил их один и тот же дантист. Материал, которым он цементировал эти коронки, обладал полупроводниковыми свойствами. В коронке образовался миниатюрный детекторный приемник, случайно настроенный на волну торговых радиопередач. Продетектированный сигнал через зубные нервы передавался непосредственно в мозг.

Возможно, со временем удастся специально использовать этот метод радиосвязи. Многие из пациентов, вероятно, будут не прочь иметь приемник в зубной коронке, если, конечно, учтя горький опыт, найдут способ его выключать.

V.63



Любопытно устройство прибора, следящего за режимом дыхания при оперировании больных. Нормальный режим дыхания обеспечивает определенное содержание кислорода в крови. В зависимости от кислорода изменяется прозрачность крови. Достаточно напра-

вить свет на ушную раковину больного, а по другую сторону ее установить фотодиод (см. V. 44), и решена задача огромной важности: можно по ходу всей операции наблюдать за составом крови, то есть следить за тем, как дышит больной.

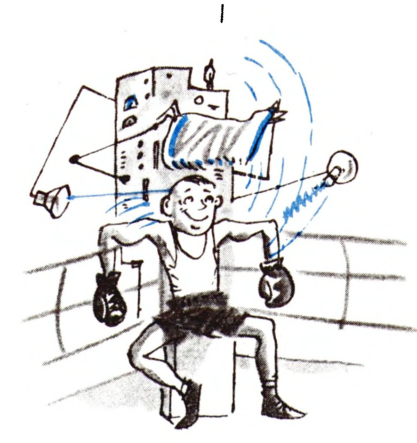
V.64

Своеобразное действие могут оказывать на человека импульсы тока: от их воздействия человек погружается в сон. Причины такой реакции еще недостаточно ясны, но что касается результатов, то они налицо. Специальный импульсный генератор служит отличным средством для лечения нервных заболеваний.

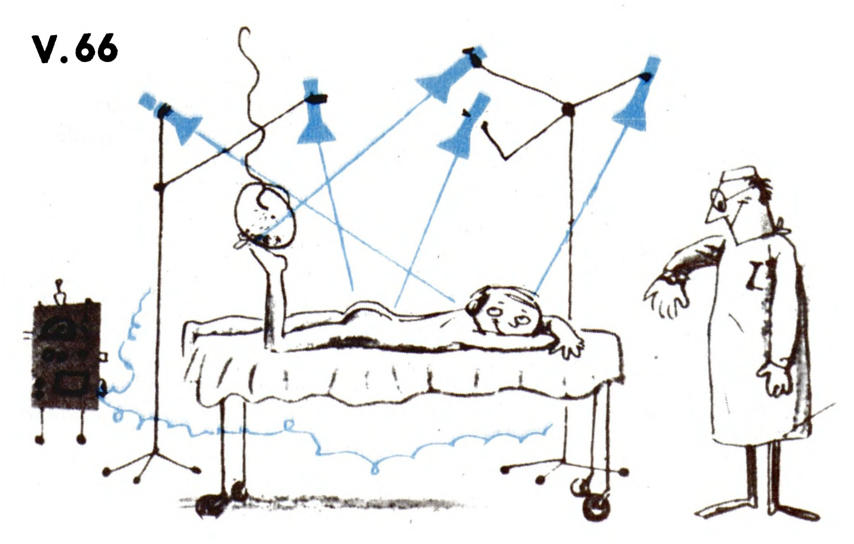


V.65

Зато при других частотах и амплитудах импульсы станут источником силы и бодрости. С их помощью можно тренировать поврежденные мышцы, ликвидировать последствия паралича. Это делается с помощью электромассажей, в которых тоже участвуют электронные стимуляторы — источники импульсов определенных частот.



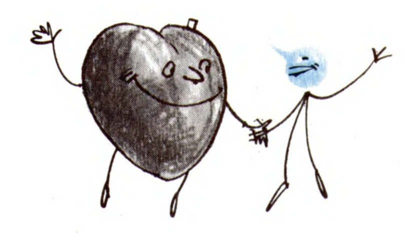
V.66



Исследуется вопрос о применении электрических импульсов для лечения методом иглоукалывания. Иглоукалыванием это можно назвать лишь фигурально. Необходимость в игле отпадает: электрический импульс проникает внутрь живых тканей и возбуждает определенные нервные центры не хуже самой тонкой иглы.

V.67

Медицине давно известно заболевание сердца, названное «поперечной блокадой». Ритм сердца падает до 12—20 ударов в минуту, больному грозит смерть. Для борьбы с этим заболеванием врачи клиники Московского 2-го медицинского института решили использовать электронные стимуляторы и обратились за помощью в общественное конструкторское бюро. Электронные стимуляторы сердца были известны и раньше, но генераторы импульсов всегда стояли снаружи, а в сердце вводились специальные электроды. Способ был неудобен и даже опасен: через отверстия для электродов в организм могли проникать микробы. Творческое содружество врачей и инженеров по-



зволило создать полупроводниковый имплантируемый (то есть вживляемый) стимулятор. Он весит всего 125 граммов и потребляет так мало энергии, что маленькой батарейки хватает для его непрерывной работы в течение двух с половиной лет.

Кто кому?

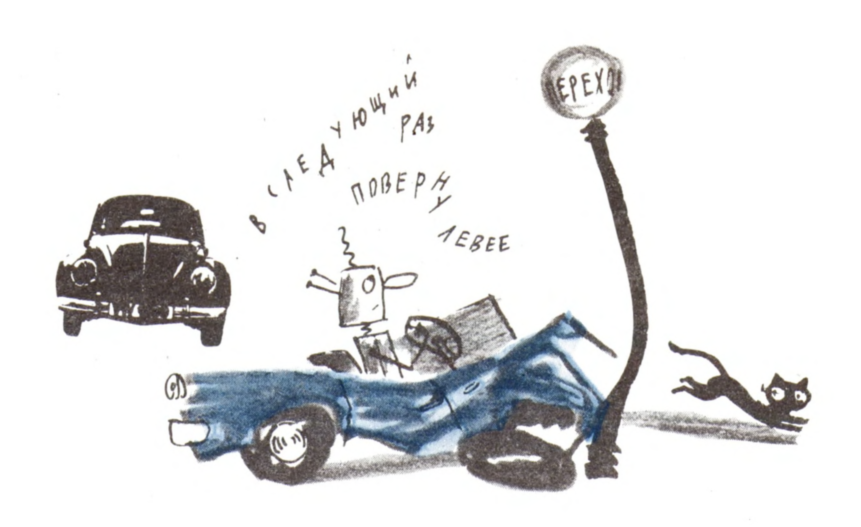
Возможно, наступит такое время, когда устройство того или иного «живого прибора» будет изучено досконально и инженеру останется лишь создать его копию, чтобы использовать ее для технических нужд. Но пока такие вопросы решаются иначе: не летучая мышь породила локацию; локация создана инженерами. А средства и методы, возникшие в локационной технике, помогли изучить летучую мышь.

Тем не менее теперь уже можно пытаться идти от противного. Бионика позволяет «брать у природы уроки». Техника учится у подсолнуха следить за тем, как движется солнце; у рыб и собак она заимствует их способность обнаруживать едва уловимые запахи; киты и дельфины служат примером наилучших пропорций и форм для быстрого плавания, а аист дает пищу для размышлений о том, какие факторы обеспечат летательным аппаратам самый экономичный полет.

У природы есть много таких совершенных «приборов», о которых технике пока приходится только мечтать. У гремучей змеи обнаружен приемник, «настроенный» на инфракрасные волны. Приемник этот столь совершенен, что чувствует измеряемую тысячными долями градуса разность температур! Ни одному живому объекту, излучающему тепло в окружающее пространство, от такого приемника не ускользнуть.

Глаз лягушки и подковообразного краба обладает способностью увеличивать контраст очертаний одного из предметов на фоне всех остальных. Прекрасное качество! Прибор, наделенный такой способностью, помог бы производить детальный анализ рентгеновских снимков или аэрофотосъемок, произведенных с больших высот.

А как ориентируется голубь? Почему он всегда находит обратный путь к дому? Даже в том случае, если его увози-



ли в темной корзине, он все равно безошибочно возвращался назад.

Есть разные предположения. Одни утверждают, что он принимает излучение Солнца и ориентируется по нему. Другие считают, что у голубя есть особый «прибор», реагирующий на земное вращение. Третьи выдвигают гипотезу, что ориентация голубя объясняется восприятием магнитного поля Земли. Вопрос изучается. Опять, конечно, с участием электроники. Голубь снабжается миниатюрным радиопередатчиком, сигналы которого дают возможность проследить весь полет.

Не хуже голубя ориентируются и морские черепахи. Они уплывают за несколько тысяч километров, а затем возвращаются в определенное место для кладки яиц.

Есть одно общее качество живых организмов, которому техника должна, пожалуй, завидовать больше, чем всем остальным. Это способность приспосабливаться к самым разнообразным, а порой неожиданным обстоятельствам, способность ориентироваться в обстановке, взаимодействовать со средой.

В этом смысле самый сложный из автоматов гораздо более примитивен, чем самый простой организм. А качество это крайне необходимо. Без него нельзя создать электронный прибор, который мог бы водить машину по улицам города, решать сложные производственные вопросы, проводить научный эксперимент. Во всех этих случаях могут возникнуть и непредвиденные осложнения. Живой организм почти всегда найдет выход. А автоматы пока еще слишком односторонни: если хотя бы один из факторов не учтен в их программе, весь процесс управления будет сведен на нет.

Решать эти задачи тоже поможет бионика. Прежде всего надо выяснить, как решает их живой организм.

Бионика — молодая наука. У нее нет еще единых универсальных методов. Еще не написано ни специальных учебников по бионике, ни исчерпывающих капитальных трудов. Но есть общие интересы у электроники и биологии, есть неразгаданные принципы, созданные природой, и есть призыв к физикам, биологам и инженерам объединить усилия, чтобы познать, понять, применить.

Можно сказать, что бионика, как наука, даже еще не создана — она пока только провозглашена.

Плоды одного столетия

(Заключение)

Вот мы и у финиша. Можно теперь подводить итоги всему, что повстречалось в пути.

Рассказать хотелось о многом. Но пришлось ограничиться основным. Коснуться только фундаментальных идей, возникавших на разных этапах создания электроники и послуживших главными вехами на ее славном пути. Показать, как одни и те же идеи могут использоваться для самых различных целей. А главное — убедить читателя в том, что без электроники нет XX века, точно так же как нет культуры древней Эллады без ее дворцов, храмов и великолепных скульптур.

Подумать только: все гигантское здание электроники было воздвигнуто человечеством всего за одно столетие. Лишь около ста лет назад Гельмгольц обнаружил «порцию электричества», носителем которой оказался впоследствии электрон.

Закончив маршрут, всегда полезно последний раз оглянуться. Взгляду откроется панорама, и, быть может, последнее впечатление и окажется наиболее полным.

Как же выглядит электроника, если, окинув прощальным взглядом, попытаться увидеть ее сразу всю целиком?

Воображению рисуется гигантское дерево, корни которого уходят в глубокую научную почву, а ветви тянутся ко всем областям.

Так выглядит это могучее дерево в данный момент. А что станет с ним завтра, через 10 и 20 лет? На этот вопрос не возьмется ответить ученый. И едва ли рискнет ответить фантаст. Кто знает, какие вырастут новые ветви и какие родят-

ся плоды? Ведь в начале нашего века это дерево дало лишь самый первый побег.

Первая радиостанция, созданная Поповым, связала Кронштадт с островом Гогланд в 1900 году. И с тех пор каждое десятилетие порождало новую ветвь.

Десятые годы нашего века — радио учится говорить.

Двадцатые — дальние передачи. Связь на ультракоротких, отраженных ионосферой волнах.

Тридцатые — освоено телевидение.

Сороковые — радиолокационные станции, волны с длиной до трех сантиметров, удивительные приборы: клистрон, магнетрон, лампа бегущей волны.

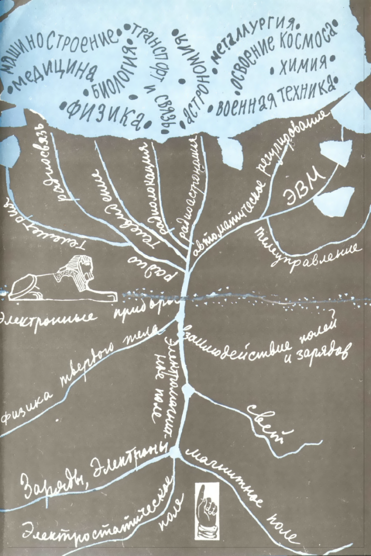
Пятидесятые — вычислительные машины, внедрение полупроводниковых приборов.

Шестидесятые — квантовые генераторы. На помощь радиоизлучениям пришли световые лучи.

Семидесятые...

Что принесут ближайшие десятилетия? Судить об этом не так-то просто. Ведь всего лет двадцать назад никто не думал ни об электронном мозге, ни о создании «умных» машин.

До сих пор электроника развивалась стремительно, но во второй половине столетия темп развития будет все время расти. Нельзя предречь всех направлений ее развития, но можно с полной уверенностью сказать: какие бы отрасли техники ни возникали в ближайшем или далеком будущем, электроника еще долго останется на передовых рубежах.


МАШИНОСТРОЕНИЕ
МЕДИЦИНА
ФИЗИКА
БИОЛОГИЯ
ТРАНСПОРТ И СВЯЗЬ
АСТРОНОМИЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ
ОСВОЕНИЕ КОСМОСА
ХИМИЯ
ВОЕННАЯ ТЕХНИКА
телеметрия
радиосвязь
радио
телевидение
радиолокация
радиоастрономия
автоматическое регулирование
ЭВМ
телеуправление
Электронные приборы
физика твердого тела
взаимодействие полей и зарядов
Электромагнитное поле
свет
Заряды, Электроны
магнитное поле
Электростатическое поле

ОГЛАВЛЕНИЕ

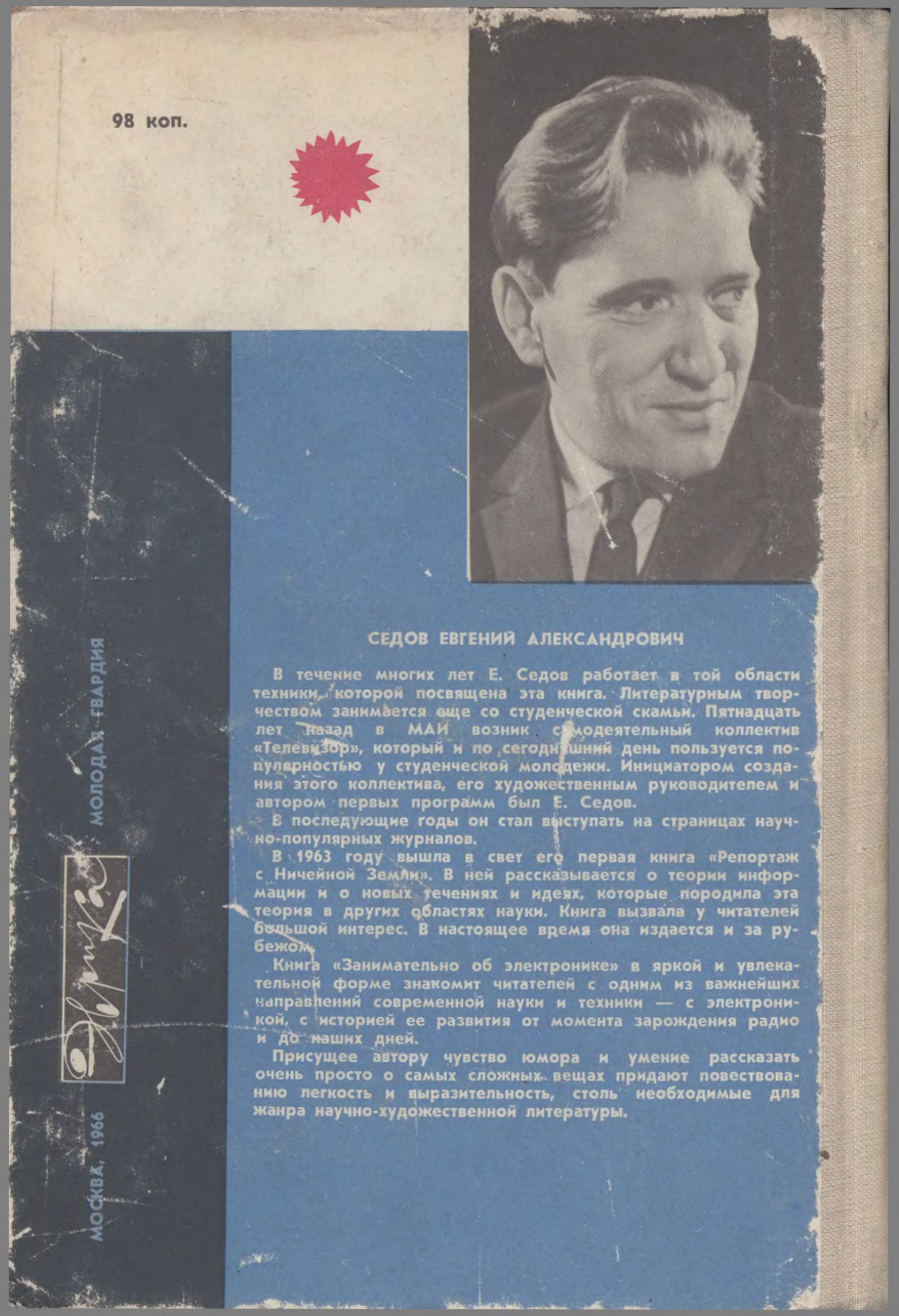
Седов Евгений Александрович

ЗАНИМАТЕЛЬНО ОБ ЭЛЕКТРОНИКЕ. М., «Молодая гвардия», 1966. 352 с., с илл. 6П2.15

Редактор *В. Федченко*
Художник *Б. Диодоров*
Худож. редактор *Ю. Позин* Техн. редактор *Н. Михайловская*

А15173. Подп. к печ. 18/Х 1966 г. Бум. 60×90¹/₁₆. Печ. л. 22 (22). Уч.-изд. л. 20,3. Тираж 65 000 экз. Заказ 923. Цена 98 коп. Т. П. 1965 г., № 142.

Типография «Красное знамя» изд-ва «Молодая гвардия». Москва, А-30, Сущевская, 21.



СЕДОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

В течение многих лет Е. Седов работает в той области техники, которой посвящена эта книга. Литературным творчеством занимается еще со студенческой скамьи. Пятнадцать лет назад в МАИ возник самодеятельный коллектив «Телевизор», который и по сегодняшний день пользуется популярностью у студенческой молодежи. Инициатором создания этого коллектива, его художественным руководителем и автором первых программ был Е. Седов.

В последующие годы он стал выступать на страницах научно-популярных журналов.

В 1963 году вышла в свет его первая книга «Репортаж с Ничейной Земли». В ней рассказывается о теории информации и о новых течениях и идеях, которые породила эта теория в других областях науки. Книга вызвала у читателей большой интерес. В настоящее время она издается и за рубежом.

Книга «Занимательно об электронике» в яркой и увлекательной форме знакомит читателей с одним из важнейших направлений современной науки и техники — с электроникой, с историей ее развития от момента зарождения радио и до наших дней.

Присущее автору чувство юмора и умение рассказать очень просто о самых сложных вещах придают повествованию легкость и выразительность, столь необходимые для жанра научно-художественной литературы.